

E.T.S de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

# Estudio aerodinámico de una motocicleta de competición



Grado en Ingeniería Mecánica

Trabajo de Fin de Grado

Sergio Alfaro Ezcurra

Javier León Iriarte

Pamplona, 26 de junio de 2017









**Resumen:** El presente proyecto desarrolla un estudio aerodinámico sobre una motocicleta de competición del campeonato interuniversitario Motostudent™, mediante la simulación CFD (Computational Fluid Dynamics), utilizando el software XFlow™. Se comenzará analizando el Reglamento oficial de la competición, en concreto, los apartados que afecten a la aerodinámica. Después se profundizará en los fundamentos teóricos que se deben tener en cuenta para un estudio aerodinámico. A continuación se estudiarán y solucionarán los errores que aparecen en los archivos de CAD referentes a los diferentes elementos de la moto, cuando se cargan mediante XFlow™. En lo que concierne al empleo de técnicas de simulación CFD, se realizarán unos ensayos iniciales para la obtención de un modelo computacional de análisis y estudio que servirá como base, sobre el que se trabajará posteriormente en la búsqueda de elementos que permitan mejorar la eficiencia aerodinámica de la moto. La búsqueda de mejoras aerodinámicas se centrará en reducir el coeficiente de arrastre, implementando mejoras en las llantas y carenado

**Palabras clave:** Aerodinámica, Motocicleta, CFD, XFlow™

**Abstract:** The current project develops an aerodynamic study about a competition motorcycle of the Motostudent Championship, using CFD (Computational Fluid Dynamics) with Xflow™ software. Firstly, there will be an examination of the competition Official Regulation, concretely, sections which involve aerodynamics. After, there will be a profound analysis of theoretical fundamentals related to an aerodynamic study. Besides, there will be an explanation on how to solve problems and mistakes in CAD files, especially holes on the geometry. In respect of CFD simulation techniques, this project needs one computational model to analyse and confirm that all parameters are correct and can be used as a basis model. Once the basis model is check, there will start a research of elements that will enhance the motorcycle aerodynamic efficiency. Mainly this project consist in reduce the drag coefficient by implementing upgrades on wheel rims and fairing.

**Keywords:** Aerodynamics, Motorcycle, CFD, XFlow™



## Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	19
2. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS .....	23
3. MOTOSTUDENT .....	27
3.1. La competición .....	27
3.2. Categorías .....	28
3.3. Fases de la competición .....	28
3.3.1. Fase MS1: Proyecto industrial .....	28
3.3.2. Fase MS2: Pruebas dinámicas y carrera .....	29
3.4. Análisis del Reglamento General Técnico .....	36
3.4.1. Dimensiones.....	36
3.4.2. Peso .....	40
3.4.3. Ergonomía.....	40
3.4.4. Carenado.....	41
3.4.5. Sistema de suspensión.....	43
3.4.6. Llantas.....	45
4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	51
4.1. Conceptos básicos y suposiciones .....	51
4.2. Análisis dimensional .....	52
4.2.1. Principio de homogeneidad dimensional.....	53
4.2.2. Número de Reynolds .....	53
4.2.3. Teorema de Pi Buckingham.....	54
4.2.4. Semejanza .....	54
4.2.5. Análisis dimensional aplicado a la fuerza aerodinámica .....	55
4.2.6. Fuerza y momento aerodinámicos.....	55
4.2.7. Coeficientes de fuerza y momento.....	57
4.2.8. Centro aerodinámico .....	59
4.2.9. Centro de presiones .....	59
5. AERODINÁMICA DE LA MOTO .....	63
5.1. Drag .....	63
5.2. Lift .....	66
5.3. Mejora aerodinámica .....	67
6. DISEÑO EN CAD .....	71
6.1. Digitalización de las piezas.....	71
6.1.1. Palpadores .....	71

6.1.2.	Escáner 3D.....	72
6.1.3.	Fotogrametría .....	73
6.2.	Desarrollo y modificación de los archivos de CAD .....	74
6.2.1.	1ª Prueba. Carga de los archivos en XFlow™ .....	75
6.2.2.	2ª Prueba. Reparación de las ruedas y casco .....	76
6.2.3.	3ª Prueba. Reparación del carenado .....	77
6.2.4.	4ª Prueba. Generación del piloto .....	79
7.	XFLOW™ .....	85
7.1.	Interfaz gráfica.....	85
7.1.1.	Main menu.....	86
7.1.2.	Toolbar .....	87
7.1.3.	Project tree .....	87
7.1.4.	Message view.....	89
7.1.5.	Graphic view.....	89
7.1.6.	Function viewer .....	90
7.1.7.	Transform tool .....	90
7.1.8.	Time controls.....	91
7.2.	Configuración del túnel de viento.....	91
8.	GENERACIÓN DE UN MODELO BASE .....	97
8.1.	Estudio de convergencia de la moto original.....	97
8.1.1.	Ensayo 1. Moto original. (RS: 0,3 - TRS: 0,15) .....	100
8.1.2.	Ensayo 2. Moto original. (RS: 0,1 - TRS: 0,05) .....	102
8.1.3.	Ensayo 3. Moto original. (RS: 0,1 - TRS: 0,025) .....	104
8.1.4.	Ensayo 4. Moto original. (RS: 0,1 - TRS: 0,0125) .....	107
8.1.5.	Ensayo 5. Moto original. (RS: 0,05 - TRS: 0,025) .....	109
8.1.6.	Ensayo 6. Moto original. (RS: 0,05 - TRS: 0,0125) .....	111
8.1.7.	Ensayo 7. Moto original. (RS: 0,05 - TRS: 0,00625) .....	113
8.1.8.	Convergencia de los resultados. Moto original.....	116
8.2.	Estudio de convergencia de la moto modificada en CAD.....	117
8.2.1.	Ensayo 1. Moto modificada en CAD. (RS: 0,3 - TRS: 0,15) .....	120
8.2.2.	Ensayo 2. Moto modificada en CAD. (RS: 0,1 - TRS: 0,05) .....	122
8.2.3.	Ensayo 3. Moto modificada en CAD. (RS: 0,1 - TRS: 0,025) .....	124
8.2.4.	Ensayo 4. Moto modificada en CAD. (RS: 0,1 - TRS: 0,0125) .....	126
8.2.5.	Ensayo 5. Moto modificada en CAD. (RS: 0,05 - TRS: 0,025) .....	128
8.2.6.	Ensayo 6. Moto modificada en CAD. (RS: 0,05 - TRS: 0,0125) .....	130
8.2.7.	Ensayo 7. Moto modificada en CAD. (RS: 0,05 - TRS: 0,00625) .....	132

8.2.8.	Convergencia de los resultados. Moto modificada en CAD.....	135
8.3.	Estudio de convergencia de la moto con las ruedas en movimiento .....	136
8.3.1.	Ensayo 1. Moto con ruedas en movimiento. (RS: 0,3 - TRS: 0,15) .....	138
8.3.2.	Ensayo 2. Moto con ruedas en movimiento. (RS: 0,1 - TRS: 0,05) .....	140
8.3.3.	Ensayo 3. Moto con ruedas en movimiento. (RS: 0,1 - TRS: 0,025) ....	142
8.3.4.	Ensayo 4. Moto con ruedas en movimiento. (RS: 0,1 - TRS: 0,0125) ..	144
8.3.5.	Ensayo 5. Moto con ruedas en movimiento. (RS: 0,05 - TRS: 0,025) ..	146
8.3.6.	Ensayo 6. Moto con ruedas en movimiento.(RS:0,05 - TRS: 0,0125) ..	148
8.3.7.	Ensayo 7. Moto con ruedas en movimiento. (RS:0,05 -TRS: 0,00625) ..	150
8.3.8.	Convergencia de los resultados. Moto con ruedas en movimiento.....	152
8.4.	Selección de los parámetros del modelo .....	155
9.	ESTUDIO AERODINÁMICO EN DIFERENTES SITUACIONES DURANTE UNA CARRERA .....	159
9.1.	Situación completa de paso por curva .....	162
9.2.	Situación de frenada.....	163
9.2.1.	Análisis gráfico del flujo de aire. Situación de frenada .....	169
9.3.	Situación de paso por curva .....	171
9.3.1.	Análisis gráfico del flujo de aire. Situación de paso por curva .....	177
9.4.	Situación de aceleración.....	179
9.4.1.	Análisis gráfico del flujo de aire. Situación de aceleración .....	184
9.5.	Situación de adelantamiento con rebufo .....	186
10.	CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS.....	197
10.1.	Conclusiones .....	197
10.2.	Desarrollos futuros .....	199
11.	BIBLIOGRAFÍA .....	207

## Índice de figuras

<b>Figura 3.1</b>	Puntuaciones fase MS1 .....	29
<b>Figura 3.2</b>	Penalizaciones por velocidad .....	30
<b>Figura 3.3</b>	Penalizaciones por fallos .....	31
<b>Figura 3.4</b>	Puntuaciones según clasificación de la carrera .....	35
<b>Figura 3.5</b>	Puntuaciones fase MS2 .....	36
<b>Figura 3.6</b>	Distancia mínima entre semimanillares [6] .....	37
<b>Figura 3.7</b>	Ángulo límite para elementos salientes [6] .....	37
<b>Figura 3.8</b>	Distancia libre entre pavimento y moto [6] .....	38
<b>Figura 3.9</b>	Límite para elementos que sobresalgan por la parte delantera [6] .....	38
<b>Figura 3.10</b>	Límite para elementos que sobresalgan por la parte trasera [6] .....	38
<b>Figura 3.11</b>	Anchura máxima del asiento [6] .....	39
<b>Figura 3.12</b>	Anchura máxima del carenado [6] .....	39
<b>Figura 3.13</b>	Altura máxima entre asiento y parte alta del colín [6] .....	39
<b>Figura 3.14</b>	Ángulos de posicionamiento del piloto [6] .....	41
<b>Figura 3.15</b>	Guardabarros .....	43
<b>Figura 3.16</b>	Ducati™ MotoGP™ con alerones delanteros .....	44
<b>Figura 3.17</b>	Detalle suspensión delantera .....	44
<b>Figura 3.18</b>	Detalle rueda delantera original de la moto .....	46
<b>Figura 3.19</b>	Rueda lenticular .....	47
<b>Figura 4.1</b>	Fuerzas y momentos aerodinámicos [1] .....	56
<b>Figura 4.2</b>	Sentido momento de cabeceo [1] .....	57
<b>Figura 5.1</b>	Centro de presiones en una moto [2] .....	64
<b>Figura 5.2</b>	Ducati™ MotoGP™ con alerones delanteros .....	64
<b>Figura 5.3</b>	Coeficientes de arrastre para diferentes modelos de motocicletas [2] .....	65
<b>Figura 5.4</b>	Efectos producidos por dos configuraciones de alerones [2] .....	66
<b>Figura 5.5</b>	Rueda lenticular trasera Ducati™ MotoGP™ .....	67
<b>Figura 5.6</b>	Mejora aerodinámica. Rueda lenticular .....	68
<b>Figura 6.1</b>	Honda™ RS125 .....	71
<b>Figura 6.2</b>	Máquina de coordenadas y tipos de palpadores .....	72
<b>Figura 6.3</b>	Escáner 3D y ejemplo de medición .....	73
<b>Figura 6.4</b>	Digitalización de carrocería mediante fotogrametría .....	74
<b>Figura 6.5</b>	Archivo CAD Honda™ RS125 .....	75
<b>Figura 6.6</b>	Errores en los archivos al cargar en XFlow™ .....	76
<b>Figura 6.7</b>	Archivos CAD casco y rueda trasera .....	77
<b>Figura 6.8</b>	Agujeros producidos por la eliminación del piloto .....	78
<b>Figura 6.9</b>	Reconstrucción de los agujeros en el asiento .....	78
<b>Figura 6.10</b>	Reconstrucción de los agujeros en el manillar .....	79
<b>Figura 6.11</b>	Carenado reconstruido .....	79
<b>Figura 6.12</b>	Maniquí generado en Catia™ .....	80
<b>Figura 6.13</b>	Piloto en posición de mínima resistencia aerodinámica .....	80
<b>Figura 6.14</b>	Piloto equipado con casco y joroba .....	81
<b>Figura 6.15</b>	Creación de maniquís con diferente precisión .....	81
<b>Figura 6.16</b>	Configuración final del piloto en posición de mínima resistencia .....	82
<b>Figura 7.1</b>	Interfaz gráfica .....	86
<b>Figura 7.2</b>	Ventanas del menu principal .....	87
<b>Figura 7.3</b>	Barra de herramientas .....	87
<b>Figura 7.4</b>	Project tree .....	88

<b>Figura 7.5</b> Ventana Message view .....	89
<b>Figura 7.6</b> Graphic view .....	90
<b>Figura 7.7</b> Ventana Function Viewer .....	90
<b>Figura 7.8</b> Ventana Transform tool.....	91
<b>Figura 7.9</b> Ventana Time controls .....	91
<b>Figura 7.10</b> Configuración de un túnel de viento [4] .....	92
<b>Figura 7.11</b> Moto dentro del túnel de viento .....	94
<b>Figura 8.1</b> Error en el área de referencia.....	98
<b>Figura 8.2</b> Área y longitud de referencia personalizadas .....	98
<b>Figura 8.3</b> Resultados Ensayo 1. Moto original .....	100
<b>Figura 8.4</b> Parámetro de estabilidad Ensayo 1. Moto original.....	101
<b>Figura 8.5</b> Coeficiente de arrastre Ensayo 1. Moto original .....	101
<b>Figura 8.6</b> Coeficiente de sustentación Ensayo 1. Moto original .....	102
<b>Figura 8.7</b> Resultados Ensayo 2. Moto original .....	103
<b>Figura 8.8</b> Parámetro estabilidad Ensayo 2. Moto original .....	103
<b>Figura 8.9</b> Coeficiente de arrastre Ensayo 2. Moto original .....	103
<b>Figura 8.10</b> Coeficiente de sustentación Ensayo 2. Moto original .....	104
<b>Figura 8.11</b> Resultados Ensayo 3. Moto original .....	105
<b>Figura 8.12</b> Parámetro de estabilidad Ensayo 3. Moto original.....	105
<b>Figura 8.13</b> Coeficiente de arrastre Ensayo 3. Moto original .....	106
<b>Figura 8.14</b> Coeficiente de sustentación Ensayo 3. Moto original .....	106
<b>Figura 8.15</b> Resultados Ensayo 4. Moto original .....	107
<b>Figura 8.16</b> Parámetro de estabilidad Ensayo 4. Moto original.....	107
<b>Figura 8.17</b> Coeficiente de arrastre Ensayo 4. Moto original .....	108
<b>Figura 8.18</b> Coeficiente de sustentación Ensayo 4. Moto original .....	109
<b>Figura 8.19</b> Resultados Ensayo 5. Moto original .....	109
<b>Figura 8.20</b> Parámetro de estabilidad Ensayo 5. Moto original.....	110
<b>Figura 8.21</b> Coeficiente de arrastre Ensayo 5. Moto original .....	110
<b>Figura 8.22</b> Coeficiente de sustentación Ensayo 5. Moto original .....	111
<b>Figura 8.23</b> Resultados Ensayo 6. Moto original .....	111
<b>Figura 8.24</b> Parámetro de estabilidad Ensayo 6. Moto original.....	112
<b>Figura 8.25</b> Coeficiente de arrastre Ensayo 6. Moto original .....	112
<b>Figura 8.26</b> Coeficiente de sustentación Ensayo 6. Moto original .....	113
<b>Figura 8.27</b> Resultados Ensayo 7. Moto original .....	114
<b>Figura 8.28</b> Parámetro de estabilidad Ensayo 7. Moto original.....	114
<b>Figura 8.29</b> Coeficiente de arrastre Ensayo 7. Moto original .....	115
<b>Figura 8.30</b> Coeficiente de sustentación Ensayo 7. Moto original .....	115
<b>Figura 8.31</b> Resultados de los ensayos. Moto original .....	116
<b>Figura 8.32</b> Gráfica de convergencia. Moto original .....	116
<b>Figura 8.33</b> Error de superposición en XFlow™, repercute en la medición del área frontal .....	118
<b>Figura 8.34</b> Elementos de la moto colocados correctamente .....	118
<b>Figura 8.35</b> Medición del área frontal de la moto.....	119
<b>Figura 8.36</b> Valores de área y longitud de referencia .....	119
<b>Figura 8.37</b> Turbulencia Ensayo 1. Moto modificada en CAD .....	121
<b>Figura 8.38</b> Parámetro de estabilidad Ensayo 1. Moto modificada en CAD.....	121
<b>Figura 8.39</b> Coeficiente de arrastre Ensayo 1. Moto modificada en CAD .....	121
<b>Figura 8.40</b> Coeficiente de sustentación Ensayo 1. Moto modificada en CAD .....	122
<b>Figura 8.41</b> Turbulencia Ensayo 2. Moto modificada en CAD .....	123



<b>Figura 8.42</b> Parámetro de estabilidad Ensayo 2. Moto modificada en CAD.....	123
<b>Figura 8.43</b> Coeficiente de arrastre Ensayo 2. Moto modificada en CAD .....	123
<b>Figura 8.44</b> Coeficiente de sustentación Ensayo 2. Moto modificada en CAD .....	124
<b>Figura 8.45</b> Turbulencia Ensayo 3. Moto modificada en CAD .....	125
<b>Figura 8.46</b> Parámetro de estabilidad Ensayo 3. Moto modificada en CAD.....	125
<b>Figura 8.47</b> Coeficiente de arrastre Ensayo 3. Moto modificada en CAD .....	125
<b>Figura 8.48</b> Coeficiente de sustentación Ensayo 3. Moto modificada en CAD .....	126
<b>Figura 8.49</b> Turbulencia Ensayo 4. Moto modificada en CAD .....	127
<b>Figura 8.50</b> Parámetro de estabilidad Ensayo 4. Moto modificada en CAD.....	127
<b>Figura 8.51</b> Coeficiente de arrastre Ensayo 4. Moto modificada en CAD .....	127
<b>Figura 8.52</b> Coeficiente de sustentación Ensayo 4. Moto modificada en CAD .....	128
<b>Figura 8.53</b> Turbulencia Ensayo 5. Moto modificada en CAD .....	129
<b>Figura 8.54</b> Parámetro de estabilidad Ensayo 5. Moto modificada en CAD.....	129
<b>Figura 8.55</b> Coeficiente de arrastre Ensayo 5. Moto modificada en CAD .....	129
<b>Figura 8.56</b> Coeficiente de sustentación Ensayo 5. Moto modificada en CAD .....	130
<b>Figura 8.57</b> Turbulencia Ensayo 6. Moto modificada en CAD .....	131
<b>Figura 8.58</b> Parámetro de estabilidad Ensayo 6. Moto modificada en CAD.....	131
<b>Figura 8.59</b> Coeficiente de arrastre Ensayo 6. Moto modificada en CAD .....	131
<b>Figura 8.60</b> Coeficiente de sustentación Ensayo 6. Moto modificada en CAD .....	132
<b>Figura 8.61</b> Turbulencia Ensayo 7. Moto modificada en CAD .....	133
<b>Figura 8.62</b> Parámetro de estabilidad Ensayo 7. Moto modificada en CAD.....	133
<b>Figura 8.63</b> Coeficiente de arrastre Ensayo 7. Moto modificada en CAD .....	133
<b>Figura 8.64</b> Coeficiente de sustentación Ensayo 7. Moto modificada en CAD .....	134
<b>Figura 8.65</b> Resultados de los ensayos. Moto modificada en CAD .....	135
<b>Figura 8.66</b> Gráfica de convergencia. Moto modificada en CAD .....	136
<b>Figura 8.67</b> Posiciones y velocidad angular de las ruedas .....	137
<b>Figura 8.68</b> Turbulencia Ensayo 1. Moto con ruedas en movimiento .....	138
<b>Figura 8.69</b> Parámetro de estabilidad Ensayo 1. Moto con ruedas en movimiento...	139
<b>Figura 8.70</b> Coeficiente de arrastre Ensayo 1. Moto con ruedas en movimiento .....	139
<b>Figura 8.71</b> Coeficiente de sustentación Ensayo 1. Moto con ruedas en movimiento .....	140
<b>Figura 8.72</b> Turbulencia Ensayo 2. Moto con ruedas en movimiento .....	141
<b>Figura 8.73</b> Parámetro de estabilidad Ensayo 2. Moto con ruedas en movimiento...	141
<b>Figura 8.74</b> Coeficiente de arrastre Ensayo 2. Moto con ruedas en movimiento .....	141
<b>Figura 8.75</b> Coeficiente de sustentación Ensayo 2. Moto con ruedas en movimiento .....	142
<b>Figura 8.76</b> Turbulencia Ensayo 3. Moto con ruedas en movimiento .....	143
<b>Figura 8.77</b> Parámetro de estabilidad Ensayo 3. Moto con ruedas en movimiento...	143
<b>Figura 8.78</b> Coeficiente de arrastre Ensayo 3. Moto con ruedas en movimiento .....	143
<b>Figura 8.79</b> Coeficiente de sustentación Ensayo 3. Moto con ruedas en movimiento .....	144
<b>Figura 8.80</b> Turbulencia Ensayo 4. Moto con ruedas en movimiento .....	145
<b>Figura 8.81</b> Parámetro de estabilidad Ensayo 4. Moto con ruedas en movimiento...	145
<b>Figura 8.82</b> Coeficiente de arrastre Ensayo 4. Moto con ruedas en movimiento .....	145
<b>Figura 8.83</b> Coeficiente de sustentación Ensayo 4. Moto con ruedas en movimiento .....	146
<b>Figura 8.84</b> Turbulencia Ensayo 5. Moto con ruedas en movimiento .....	147
<b>Figura 8.85</b> Parámetro de estabilidad Ensayo 5. Moto con ruedas en movimiento...	147
<b>Figura 8.86</b> Coeficiente de arrastre Ensayo 5. Moto con ruedas en movimiento .....	147



<b>Figura 8.87</b> Coeficiente de sustentación Ensayo 5. Moto con ruedas en movimiento .....	148
<b>Figura 8.88</b> Turbulencia Ensayo 6. Moto con ruedas en movimiento .....	149
<b>Figura 8.89</b> Parámetro de estabilidad Ensayo 6. Moto con ruedas en movimiento...	149
<b>Figura 8.90</b> Coeficiente de arrastre Ensayo 6. Moto con ruedas en movimiento .....	149
<b>Figura 8.91</b> Coeficiente de sustentación Ensayo 6. Moto con ruedas en movimiento .....	150
<b>Figura 8.92</b> Turbulencia Ensayo 7. Moto con ruedas en movimiento .....	151
<b>Figura 8.93</b> Parámetro de estabilidad Ensayo 7. Moto con ruedas en movimiento...	151
<b>Figura 8.94</b> Coeficiente de arrastre Ensayo 7. Moto con ruedas en movimiento .....	151
<b>Figura 8.95</b> Coeficiente de sustentación Ensayo 7. Moto con ruedas en movimiento .....	152
<b>Figura 8.96</b> Resultados de los ensayos. Moto con ruedas en movimiento .....	153
<b>Figura 8.97</b> Gráfica de convergencia. Moto con ruedas en movimiento .....	153
<b>Figura 8.98.</b> Flujo de aire en rueda fija y rueda con movimiento .....	154
<b>Figura 9.1</b> Circuito Motorland .....	160
<b>Figura 9.2</b> Estudio de la mejora aerodinámica .....	162
<b>Figura 9.3</b> Piloto en situación de frenada .....	163
<b>Figura 9.4</b> Piloto situación de frenada en Catia™ .....	164
<b>Figura 9.5</b> Medición del área frontal. Situación de frenada.....	164
<b>Figura 9.6</b> Velocidades angulares de las ruedas delantera y trasera. Situación de frenada .....	166
<b>Figura 9.7</b> Honda™ RS125 con diferentes tipos de llanta. Situación frenada.....	166
<b>Figura 9.8</b> Resultados llantas con radios. Situación frenada .....	167
<b>Figura 9.9</b> Resultados llantas lenticulares. Situación frenada.....	167
<b>Figura 9.10</b> Estudio de la mejora aerodinámica en la situación de frenada .....	168
<b>Figura 9.11</b> Reducción del coeficiente de arrastre. Situación frenada .....	168
<b>Figura 9.12</b> Comparación del flujo de aire en la rueda delantera. Situación de frenada .....	169
<b>Figura 9.13</b> Detalle del flujo de aire en el centro de la llanta. Situación de frenada ..	170
<b>Figura 9.14</b> Comparación del flujo de aire en la rueda trasera. Situación de frenada	171
<b>Figura 9.15</b> Piloto en situación de paso por curva.....	172
<b>Figura 9.16</b> Piloto situación de paso por curva en Catia™ .....	172
<b>Figura 9.17</b> Medición del área frontal. Situación de paso por curva .....	173
<b>Figura 9.18</b> Velocidades angulares de las ruedas delantera y trasera. Situación de paso por curva.....	174
<b>Figura 9.19</b> Honda™ RS125 con diferentes tipos de llanta. Situación de paso por curva.....	175
<b>Figura 9.20</b> Resultados llantas con radios. Situación de paso por curva .....	175
<b>Figura 9.21</b> Resultados llantas lenticulares. Situación de paso por curva .....	175
<b>Figura 9.22</b> Estudio de la mejora aerodinámica. Situación de paso por curva.....	176
<b>Figura 9.23</b> Reducción del coeficiente de arrastre. Situación de paso por curva.....	177
<b>Figura 9.24</b> Comparación del flujo de aire en la rueda delantera. Situación de paso por curva.....	177
<b>Figura 9.25</b> Detalle del flujo de aire en el centro de la llanta. Situación de paso por curva.....	178
<b>Figura 9.26</b> Comparación del flujo de aire en la rueda trasera. Situación de paso por curva.....	179
<b>Figura 9.27</b> Piloto en situación de aceleración .....	180

<b>Figura 9.28</b> Honda™ RS125 con diferentes tipos de llantas. Situación de aceleración .....	180
<b>Figura 9.29</b> Velocidades angulares de las ruedas delantera y trasera. Situación de aceleración .....	181
<b>Figura 9.30</b> Resultados llantas con radios. Situación de aceleración .....	182
<b>Figura 9.31</b> Resultados llantas lenticulares. Situación de aceleración.....	182
<b>Figura 9.32</b> Estudio de la mejora aerodinámica. Situación de aceleración.....	183
<b>Figura 9.33</b> Reducción del coeficiente de arrastre. Situación de aceleración .....	183
<b>Figura 9.34</b> Comparación del flujo de aire en la rueda delantera. Situación de aceleración .....	184
<b>Figura 9.35</b> Detalle del flujo de aire en el centro de la llanta. Situación de aceleración .....	185
<b>Figura 9.36</b> Comparación del flujo de aire en la rueda trasera. Situación de aceleración .....	186
<b>Figura 9.37</b> Honda™ RS125 con diferentes tipos de llantas. Situación de adelantamiento con rebufo.....	187
<b>Figura 9.38</b> Velocidades angulares de las ruedas delantera y trasera. Situación de rebufo .....	187
<b>Figura 9.39.</b> Coeficiente de arrastre de la moto generadora de rebufo.....	189
<b>Figura 9.40.</b> Motos emparejadas.....	189
<b>Figura 9.41.</b> Desplazamiento de la moto en el adelantamiento .....	190
<b>Figura 9.42.</b> Resultados moto con llantas con radios. Situación de adelantamiento con rebufo .....	191
<b>Figura 9.43.</b> Resultados moto con llantas lenticulares. Situación de adelantamiento con rebufo.....	192
<b>Figura 10.1</b> Alerones en coches de competición .....	199
<b>Figura 10.2</b> Alerones en MotoGP™ .....	200
<b>Figura 10.3</b> Turbulencia generada por el casco .....	201
<b>Figura 10.4</b> Doble carenado en la Yamaha™ de MotoGP™ .....	202
<b>Figura 10.5</b> Doble carenado implementado en la Honda™ RS125 .....	202

## Índice de ecuaciones

<b>Ecuación 3.1</b> .....	30
<b>Ecuación 3.2</b> .....	31
<b>Ecuación 3.3</b> .....	32
<b>Ecuación 3.4</b> .....	32
<b>Ecuación 3.5</b> .....	33
<b>Ecuación 3.6</b> .....	34
<b>Ecuación 3.7</b> .....	35
<b>Ecuación 4.1</b> .....	53
<b>Ecuación 4.2</b> .....	53
<b>Ecuación 4.3</b> .....	53
<b>Ecuación 4.4</b> .....	55
<b>Ecuación 4.5</b> .....	57
<b>Ecuación 4.6</b> .....	58
<b>Ecuación 4.7</b> .....	58
<b>Ecuación 4.8</b> .....	58
<b>Ecuación 4.9</b> .....	58

<b>Ecuación 4.10</b>	58
<b>Ecuación 4.11</b>	59
<b>Ecuación 7.1</b>	92
<b>Ecuación 7.2</b>	93
<b>Ecuación 7.3</b>	93
<b>Ecuación 7.4</b>	94
<b>Ecuación 7.5</b>	94
<b>Ecuación 8.1</b>	101
<b>Ecuación 8.2</b>	104
<b>Ecuación 8.3</b>	106
<b>Ecuación 8.4</b>	108
<b>Ecuación 8.5</b>	110
<b>Ecuación 8.6</b>	112
<b>Ecuación 8.7</b>	115
<b>Ecuación 8.8</b>	122
<b>Ecuación 8.9</b>	124
<b>Ecuación 8.10</b>	126
<b>Ecuación 8.11</b>	128
<b>Ecuación 8.12</b>	130
<b>Ecuación 8.13</b>	131
<b>Ecuación 8.14</b>	134
<b>Ecuación 8.15</b>	137
<b>Ecuación 8.16</b>	139
<b>Ecuación 8.17</b>	142
<b>Ecuación 8.18</b>	144
<b>Ecuación 8.19</b>	145
<b>Ecuación 8.20</b>	148
<b>Ecuación 8.21</b>	150
<b>Ecuación 8.22</b>	152



# **1. INTRODUCCIÓN**



## 1. INTRODUCCIÓN

Esta memoria recoge y describe el desarrollo del Trabajo de Fin de Grado Estudio aerodinámico de una motocicleta de competición mediante el empleo de técnicas de simulación CFD (Computational Fluid Dynamics) con el software XFlow™.

El proyecto consiste en el estudio aerodinámico de una motocicleta de competición que participará en la competición interuniversitaria Motostudent. Concretamente, se realizará un estudio de la moto en diferentes condiciones: aceleración en recta, paso por curva, ruedas con movimiento.

A su vez, se estudiarán posibles mejoras aerodinámicas que puedan implantarse en la moto, buscando los beneficios o perjuicios que aporten sobre la moto y valorando su implantación sobre la misma.

Este Trabajo de Fin de Grado se divide en 5 grandes bloques, que se detallan a continuación:

El primer bloque consiste en una descripción de la competición Motostudent y análisis del reglamento oficial, más concretamente, aquellos apartados que afecten a la aerodinámica de la motocicleta.

El segundo bloque del proyecto analiza los fundamentos de la aerodinámica y aspectos teóricos que intervienen en las simulaciones mediante programas de CFD, que servirán como base para los posteriores análisis de los estudios realizados.

En el tercer bloque del proyecto se emplean los programas Solidworks™ y Catia™ para diseñar los archivos de CAD necesarios para la realización de los ensayos y simulaciones en XFlow™. Asimismo, se profundiza en los errores que surgieron en la optimización de estos archivos y resolución de los mismos.

En el cuarto bloque, se profundiza en el programa de CFD, llamado XFlow™, buscando en primer lugar un modelo computacional de análisis y estudio sobre la moto, que servirá como modelo base para la ejecución de posteriores simulaciones, cuyo objetivo es la obtención de una mayor eficiencia aerodinámica mediante la adición de elementos que mejoren el flujo de aire alrededor de la moto.

Por último, se procederá a la búsqueda de mejoras aerodinámicas sobre la motocicleta, realizando ensayos con diferentes elementos, buscando principalmente reducir el coeficiente de arrastre. Asimismo, se estudiarán los efectos adversos que puedan producir los elementos añadidos y se realizará una valoración para verificar su implantación.



## **2. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS**



## 2. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS

El presente proyecto tiene por objetivo principal el estudio y búsqueda de mejoras en la eficiencia aerodinámica mediante el empleo de software de simulación CFD (Computational Fluid Dynamics), más concretamente, el programa XFlow™ 2015. Este programa de CFD enfocado al análisis en ingeniería, utiliza un enfoque completamente Lagrangiano, que permite resolver problemas de aerodinámica o fluidos con superficie libre, entre otros.

El proceso que se llevará a cabo en este trabajo consiste en comenzar estudiando un Reglamento oficial de una competición, analizando los aspectos que intervienen, en este caso, sobre la aerodinámica, para después tratar de realizar un modelo computacional, que permita simular las condiciones reales en las que se encuentre la moto. Para ello, se conseguirá un alto grado de competencia en el uso de software CFD, que permita un correcto análisis de los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones que se realicen en el programa. Finalmente, se procederá con la búsqueda de elementos que mejoren la aerodinámica, analizando las ventajas e inconvenientes de su implantación.

Primeramente, se estudiará el Reglamento oficial de Motostudent, haciendo hincapié en los aspectos del mismo que intervengan o afecten a la aerodinámica de la moto. A su vez, se profundizará en el análisis de los fundamentos teóricos que afectan a la aerodinámica. Estos dos bloques del trabajo permitirán obtener una base teórica que permitirá la ejecución y análisis de los posteriores apartados del proyecto, examinando y comparando los resultados obtenidos en los diferentes ensayos que se lleven a cabo.

Posteriormente, se profundiza en el diseño CAD (Computer Aided Design), se parte de un archivo obtenido del equipo Motostudent, en el cual todos los elementos de la moto, incluido el piloto forman una única superficie. Debido a la necesidad de variar la posición del piloto sobre la moto y dar movimiento rotacional a las ruedas de la moto, es indispensable la división de todo el conjunto original en diferentes archivos que contengan cada elemento. Esta operación implicó diferentes errores en los archivos de CAD, debido sobre todo

a la aparición de agujeros dentro de las geometrías, que desviaban el flujo de aire cuando se ejecutaban las simulaciones dentro del programa XFlow™.

Una vez analizados y subsanados estos errores en los archivos CAD, se procede a la explicación y estudio del software CFD, concretamente, el programa XFlow™. Aunque no se han añadido a la memoria, se realizaron una serie de tutoriales de iniciación que ofrece el programa, para afianzar los conceptos y establecer una base para comenzar con el proyecto. Tras la ejecución de estos tutoriales, se procede a la realización de ensayos con la moto dentro del túnel de viento virtual generado en XFlow™. El objetivo de estos primeros ensayos es la obtención de un modelo computacional base, que será utilizado en las posteriores pruebas, donde se buscarán elementos que mejoren la eficiencia aerodinámica de la motocicleta.

Por último, el proyecto profundiza en la búsqueda de mejoras aerodinámicas que permitan a la moto obtener una mayor eficiencia aerodinámica. Principalmente, se intentará reducir el coeficiente de arrastre mediante la adición de elementos o apéndices sobre la moto. Se realizará un análisis completo de los ensayos que se lleven a cabo con estas piezas, y se valorarán los aspectos positivos y negativos que aporten. La mejora aerodinámica se simulará en diferentes situaciones de carrera, comparando los resultados con los ensayos en los que no esté instalada la mejora. Las situaciones estudiadas son, la frenada, el paso por curva, la aceleración y el adelantamiento en rebufo, en ésta última se estudiará cómo afecta el vacío generado por la moto delantera a una moto que viene por detrás.

### **3. MOTOSTUDENT**



### 3. MOTOSTUDENT

En este capítulo se profundizará en todos los apartados relacionados con la competición Motostudent. En primer lugar se realizará una breve descripción de la competición, objetivos planteados, pruebas de evaluación, así como períodos de prueba o categorías. Después se analizarán los diferentes aspectos que se evalúan durante las fases MS1 y MS2 y a continuación se desarrollará el estudio del Reglamento Técnico Oficial de la competición [6], estudiando los apartados que afecten directa o indirectamente a la aerodinámica de la moto.

Hay que añadir que el equipo Motostudent™ 2016, se configuró durante los meses de Noviembre y Diciembre de 2015, durante este período se realizaron varias reuniones entre los miembros del equipo y el profesor del proyecto, José Sancho, en las cuales se decide participar en la competición y se divide el trabajo de las diferentes áreas a desarrollar entre los componentes del equipo.

El estudio aerodinámico de la moto recae sobre los alumnos Sergio Alfaro Ezcurra y Rubén Huarte Martínez. El primer estudiante, y al que pertenece la presente memoria, dedicaría su proyecto al estudio de la moto en diferentes situaciones de carrera, así como la implementación de una mejora aerodinámica (llanta lenticular). El segundo estudiante realizaría un estudio analizando la implementación de unos alerones en la zona delantera del carenado, con el objetivo de corregir las elevaciones del tren delantero en aceleraciones. Ambos compañeros comenzarían el proyecto de manera conjunta resolviendo problemas que surgieron con los archivos CAD, en los cuales se profundiza en el Capítulo 6

#### 3.1. La competición

MotoStudent™ es una competición internacional interuniversitaria promovida por la Fundación Moto Engineering Foundation y TechnoPark Motorland. El objetivo de este evento es el diseño y fabricación de una motocicleta de competición, la cual participará posteriormente en una serie de pruebas, que evaluarán diferentes aspectos además de su rendimiento frente al resto de contrincantes.

El desafío de los equipos consiste en desarrollar una moto, que sea capaz de superar las diferentes pruebas y test que se realicen. En un período de 3 semestres (18 meses) los miembros del equipo pondrán a prueba su capacidad de diseño, creatividad e innovación, que permita demostrar sus habilidades y aptitudes en ingeniería contra otras universidades del mundo. Asimismo, los ingenieros deberán hacerse cargo de la economía del equipo, realizando una previsión y estudio de costes de fabricación y compra de componentes de la moto, transporte y alquiler de circuito para pruebas. Deberán utilizar sus habilidades empresariales para conseguir patrocinadores, que serán la principal fuente de financiación del equipo.

### 3.2. Categorías

La competición presenta dos categorías diferentes:

- MotoStudent Petrol: Las motos deben usar un sistema de propulsión mediante motor de combustión interna.
- MotoStudent Electric: Las motos deben utilizar un sistema de propulsión 100% eléctrico.

### 3.3. Fases de la competición

Tanto las motos como los proyectos industriales serán juzgados y evaluados en una serie de pruebas divididas en dos fases, denominadas MS1 y MS2.

#### 3.3.1. Fase MS1: Proyecto industrial

Fase demostrativa en la que los equipos deberán mostrar y explicar el diseño del prototipo realizado y el proyecto de industrialización para su producción en serie.

El objetivo del proyecto consiste en el diseño, desarrollo y proceso de fabricación de una motocicleta de competición para circuito, con una previsión



de producción en serie anual de 600 unidades, con un coste de fabricación de 9750 €/unidad.

La estructuración del proyecto debe contar con los siguientes apartados:

1. Diseño del vehículo
2. Análisis y cálculos técnicos
3. Proyecto de Innovación
4. Definición del sistema de fabricación e industrialización
5. Análisis de costes del desarrollo y proceso industrial de fabricación en serie

La fase MS1 será evaluada en un total de 500 puntos distribuidos tal y como se muestra en la Figura 3.1:

PRESENTACIÓN	ASPECTO	PUNTUACIÓN
Diseño e innovación	A. Diseño del vehículo	75
	B. Análisis y cálculos técnicos	125
	C. Proyecto de innovación	100
Industrialización	D. Definición del sistema de fabricación e industrialización	125
	E. Análisis de costes del desarrollo y proceso industrial de fabricación en serie	75
<b>TOTAL</b>		<b>500</b>

**Figura 3.1** Puntuaciones fase MS1

### 3.3.2. Fase MS2: Pruebas dinámicas y carrera

Fase de pruebas para evaluar el comportamiento dinámico y las prestaciones de la moto fabricada, así como la destreza de los equipos en mecánica y Organización.

Para poder puntuar en la Fase MS2, los equipos deben superar un mínimo del 40% de la puntuación en la Fase MS1.

La Fase MS2 consta de 7 pruebas puntuables:

#### 1) Prueba de frenado:

Esta prueba consiste en evaluar la distancia necesaria para detener la moto por completo a partir de una velocidad mínima de 80 km/hora.

La evaluación de la prueba se realizará mediante una extrapolación con los resultados obtenidos, empleando la Ecuación 3.1:

$$\frac{M_F - D}{M_F - P_F} = \frac{60 - P}{59}$$

**Ecuación 3.1**

$M_F$ : Distancia de la frenada más eficiente

$P_F$ : Distancia de la frenada menos eficiente

$D$ : Distancia de la frenada a evaluar

$P$ : Puntuación de la frenada a evaluar

La puntuación de la prueba puede oscilar entre 1 punto para la frenada menos eficiente y 60 puntos para la mejor frenada.

Si la velocidad medida en el Speed Trap es inferior a 80 km/h, se aplicarán las siguientes penalizaciones (Figura 3.2)

Velocidad (km/h)	Penalización
79	+ 2 m
78	+ 3 m
77	+ 4 m
76	+ 5 m
75	+ 6 m
70-74	+ 10 m
<70	Medición nula

**Figura 3.2** Penalizaciones por velocidad

## 2) Gymkhana:

La segunda prueba es una pequeña gymkhana cronometrada.

Las penalizaciones por cometer fallos se muestran en la Figura 3.3:

<u>Fallo</u>	<u>Penalización</u>
Desplazar o tirar un cono	+ 5 segundos.
No sobrepasar un cono por el lugar correcto	+ 10 segundos

**Figura 3.3** Penalizaciones por fallos

Estas penalizaciones se suman a la medición total de la prueba.

La puntuación de la prueba se realizará con los tiempos recogidos de todos los equipos y realizando extrapolación mediante la Ecuación 3.2.

$$\frac{M_T - T}{M_T - P_T} = \frac{100 - P}{99}$$

**Ecuación 3.2**

$M_T$ : Tiempo más rápido

$P_T$ : Tiempo más lento

$T$ : Tiempo a evaluar

$P$ : Puntuación del tiempo a evaluar

De esta aproximación se obtendrá la puntuación de la prueba, que oscilará entre 1 punto para el tiempo más lento y 100 puntos para el tiempo más rápido.

### 3) Prueba de aceleración:

Esta prueba evalúa la aceleración de la moto desde parado en una recta de 150 metros.

La puntuación se obtendrá como en las anteriores pruebas mediante una extrapolación (Ecuación 3.3):

$$\frac{M_T - T}{M_T - P_T} = \frac{60 - P}{59}$$

**Ecuación 3.3**

$M_T$ : Tiempo más rápido

$P_T$ : Tiempo más lento

$T$ : Tiempo a evaluar

$P$ : Puntuación del tiempo a evaluar

La puntuación de la prueba puede oscilar entre 1 punto para la aceleración más lenta y 60 puntos para la mejor aceleración.

4) Prueba de mecánica para equipos:

Esta prueba consiste en valorar la rapidez de trabajo en el box por parte del equipo, así como si se ha tenido en cuenta este aspecto a la hora de diseñar la moto. Esta prueba será realizada únicamente por dos miembros del equipo.

La prueba consistirá en el desmontaje y montaje completo de la cubierta superior y carenado de la moto, sin incluir el colín. Al comienzo y final de la prueba la moto deberá estar ensamblada tal y como se concibe para su circulación en pista.

Se medirá el tiempo necesario para realizar la prueba y se extrapolará empleando la Ecuación 3.4:

$$\frac{M_T - T}{M_T - P_T} = \frac{30 - P}{29}$$

**Ecuación 3.4**

$M_T$ : Tiempo más rápido

$P_T$ : Tiempo más lento

$T$ : Tiempo a evaluar

**P: Puntuación del tiempo a evaluar**

La puntuación oscilará entre 1 punto para el tiempo más lento y 30 puntos para el tiempo más rápido.

**5) Prueba de velocidad máxima en Speed Trap**

Esta prueba se realizará durante los entrenamientos y consiste en obtener la máxima velocidad en un punto determinado del circuito. Se llevará a cabo la medición de velocidad durante los primeros 40 minutos de los entrenamientos.

Las puntuaciones se obtendrán de nuevo con una extrapolación (Ecuación 3.5):

$$\frac{V_{MAX} - V}{V_{MAX} - V_{MIN}} = \frac{30 - P}{29}$$

**Ecuación 3.5**

$V_{MAX}$ : Velocidad máxima

$V_{MIN}$ : Velocidad mínima

$V$ : Velocidad a evaluar

$P$ : Puntuación

La puntuación oscilará entre 1 punto para la menor velocidad y 30 puntos para la máxima velocidad.

**6) Pole position**

Esta prueba consiste en conseguir la vuelta más rápida al circuito, se realizará durante la sesión de entrenamientos cronometrados.

De nuevo con los tiempos obtenidos se realizará una extrapolación utilizando la Ecuación 3.6 para obtener las puntuaciones:

$$\frac{M_T - T}{M_T - P_T} = \frac{40 - P}{39}$$

**Ecuación 3.6**

$M_T$ : Tiempo más rápido

$P_T$ : Tiempo más lento

$T$ : Tiempo a evaluar

$P$ : Puntuación

La puntuación oscilará entre 1 punto para el tiempo más lento y 40 puntos para el tiempo más rápido.

#### 7) Carrera

Se desarrollarán de manera independiente las carreras de “MotoStudent Petrol” y “MotoStudent Electric”. Ambas se realizarán en el trazado Gran Prix FIM Internacional de Motorland Aragón, con una longitud de 5077,65 metros.

La parrilla de salida tendrá una configuración de 3 motos en cada línea y el orden de salida según los tiempos más rápidos obtenidos por cada moto durante la sesión de entrenamientos cronometrados.

La carrera de “MotoStudent Petrol” se desarrollará a 8 vueltas (40,6 km) y la carrera de “MotoStudent Electric” a 5 vueltas (25,38 km)

Las puntuaciones de la carrera se obtendrán según la clasificación de la carrera (Figura 3.4):

Posición	Puntuación	Posición	Puntuación
1º	150	16º	18
2º	125	17º	16
3º	105	18º	14
4º	90	19º	12
5º	80	20º	10
6º	70	21º	8
7º	60	22º	7
8º	55	23º	6
9º	50	24º	5
10º	45	25º	4
11º	40	26º	3
12º	35	27º	3
13º	30	28º	3
14º	25	...	3
15º	20	45º	3

**Figura 3.4** Puntuaciones según clasificación de la carrera

8) Vuelta rápida en carrera:

Durante la carrera se evaluará la vuelta rápida y como en anteriores pruebas se llevará a cabo una extrapolación con la Ecuación 3.7:

$$\frac{M_T - T}{M_T - P_T} = \frac{30 - P}{29}$$

**Ecuación 3.7**

$M_T$ : Tiempo más rápido

$P_T$ : Tiempo más lento

$T$ : Tiempo a evaluar

$P$ : Puntuación

De esta aproximación se obtendrá la puntuación, que oscilará entre 1 punto para el tiempo más lento y 30 puntos para el tiempo más rápido.

La Figura 3.5 muestra las diferentes pruebas de la fase MS2 y sus puntuaciones máximas:

Categoría	Sesión	Prueba	Puntuación
Pruebas dinámicas	Pruebas en pista	1.- Prueba de frenado	60
		2.- Gymkhana	100
		3.- Prueba de aceleración	60
	Pruebas en box	4.- Prueba de mecánica	30
Carrera	Entrenamientos libres	5.- Vmax en speed trap	30
	Entrenamientos cronometrados	6.- Pole position	40
	Carrera	7.- Vuelta rápida en carrera	30
		8.- Posición en carrera	150
		Total	500

**Figura 3.5** Puntuaciones fase MS2

### 3.4. Análisis del Reglamento General Técnico

En este apartado se va a realizar un estudio de los aspectos del Reglamento que intervienen de manera directa o indirecta en la aerodinámica de la motocicleta, esta normativa busca una estandarización de las motos evitando que se busquen soluciones que permitan obtener ventaja frente a otros equipos. Si hay algún tipo de incumplimiento de los aspectos técnicos o restricciones del Reglamento, deberán corregirse antes de que la motocicleta participe en cualquiera de las pruebas del evento.

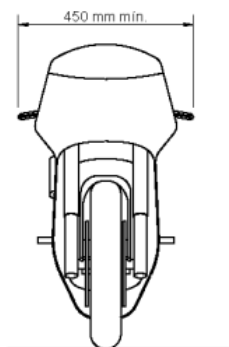
Las motos que compitan en la competición MotoStudent deben ser de fabricación propia. Se debe cumplir el Reglamento de la competición a la hora de diseñar y fabricar la moto, para poder participar en las diferentes fases y pruebas puntuables.

#### 3.4.1. Dimensiones

El Reglamento contiene una serie de requisitos básicos de obligado cumplimiento, si los ingenieros cumplen estas pautas, tienen total libertad para elegir el resto de dimensiones de la moto.

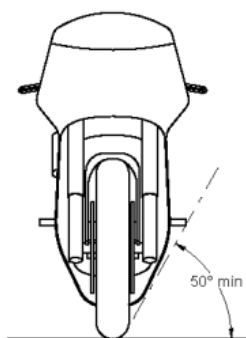
- 1) Anchura mínima entre los extremos de los semimanillares debe ser 450 mm, tal y como se muestra en la Figura 3.6.





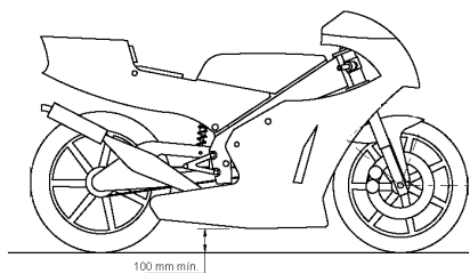
**Figura 3.6** Distancia mínima entre semimanillares [6]

- 2) Ángulo mínimo de inclinación lateral de la moto sin que ningún elemento de la misma (excepto los neumáticos) toque el asfalto debe ser  $50^\circ$ , como se observa en la Figura 3.7 la prueba se realiza sin el piloto.



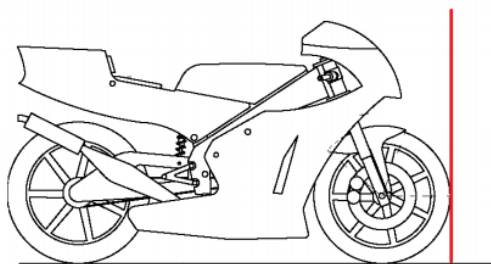
**Figura 3.7** Ángulo límite para elementos salientes [6]

- 3) La distancia libre entre el pavimento y la moto en posición vertical debe ser un mínimo de 100 mm, en cualquier configuración de suspensiones o reglajes de geometrías (Figura 3.8).



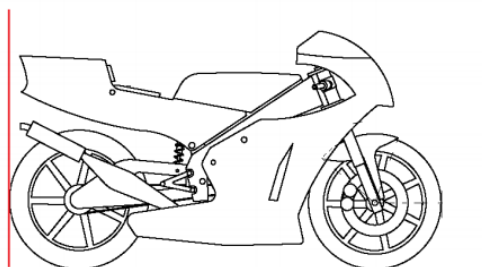
**Figura 3.8** Distancia libre entre pavimento y moto [6]

- 4) Ningún elemento de la moto puede traspasar la vertical trazada tangencialmente a la circunferencia exterior del neumático delantero (Figura 3.9).



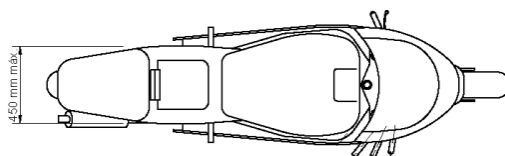
**Figura 3.9** Límite para elementos que sobresalgan por la parte delantera [6]

- 5) Ningún elemento de la moto puede traspasar la vertical trazada tangencialmente a la circunferencia exterior del neumático trasero (Figura 3.10).



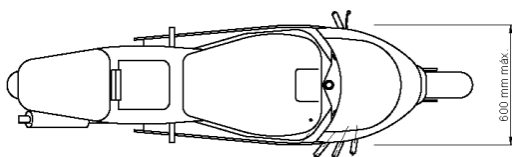
**Figura 3.10** Límite para elementos que sobresalgan por la parte trasera [6]

- 6) Los neumáticos deben tener una distancia mínima de 15 mm a cualquier elemento de la moto, exceptuando las llantas.
- 7) La anchura máxima del asiento debe ser 450 mm. Ningún elemento por detrás del asiento podrá sobresalir de esta anchura (Figura 3.11).



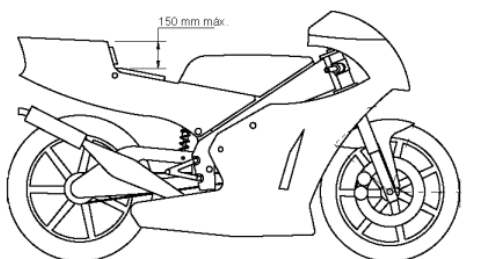
**Figura 3.11** Anchura máxima del asiento [6]

- 8) La anchura máxima del carenado será de 600 mm, como se muestra en la Figura 3.12.



**Figura 3.12** Anchura máxima del carenado [6]

- 9) Entre la altura del asiento y la parte más alta del colín no puede haber más de 150 mm de diferencia, se observa con más detalle en la Figura 3.13.



**Figura 3.13** Altura máxima entre asiento y parte alta del colín [6]

### 3.4.2. Peso

El peso de la moto es un factor importante que se debe controlar, puesto que afecta tanto a la velocidad punta de la moto, como al manejo que pueda realizar el piloto. Un peso elevado contribuye a que la moto alcance menores velocidades y requiere mayor esfuerzo por parte del piloto para moverla. Por tanto, el objetivo es estar lo más cerca posible al peso mínimo.

El peso mínimo de la motocicleta sin el piloto serán 95 Kg. El peso total de la moto debe ser superior al indicado en cualquier momento del evento.

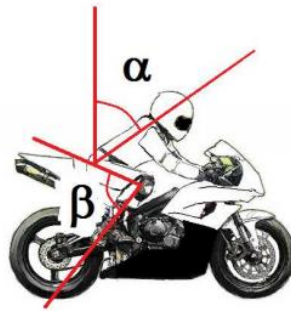
Se permite el uso de lastre móvil o fijo para alcanzar el peso mínimo permitido.

En la realidad, el peso es un condicionante de la velocidad de la moto y se tiene en cuenta a la hora de calcular la velocidad máxima en el circuito, por tanto es un factor que afecta de manera indirecta a la aerodinámica, debido a que en la puesta a punto de la moto en lo que se refiere a aerodinámica, se realiza en base a la velocidad punta que se desea obtener en el circuito. En este proyecto, la velocidad máxima de la moto se va a suponer y por tanto, el peso no se tendrá en cuenta.

### 3.4.3. Ergonomía

El diseño de la moto deberá estar dentro de los límites de ergonomía que correspondan a un piloto de estatura y peso medios.

Tomando el percentil 95 (que comprende al 95% de la población), la posición de pilotaje de una moto deportiva estándar, en posición normal de conducción (no en posición de máxima velocidad), debe estar comprendida entre los ángulos mostrados en la Figura 3.14:



**Figura 3.14** *Ángulos de posicionamiento del piloto [6]*

El ángulo  $\alpha$ , es el ángulo de la espalda con la vertical. Los ángulos recomendados están entre  $19^\circ$  y  $40^\circ$ .

El ángulo  $\beta$ , es el ángulo de flexión de las rodillas. Los ángulos recomendados están entre  $65^\circ$  y  $77^\circ$ .

Para la generación del piloto en CAD, se ha utilizado la herramienta “Human Measurement Editor” del programa Catia™, este procedimiento se explicará más detalladamente en posteriores apartados. La estatura del piloto es 1,67m.

#### 3.4.4. Carenado

Para el apartado de aerodinámica, el carenado es la parte más importante de la moto, ya que recubre toda la estructura y la mayoría de componentes. Debe ajustarse lo máximo posible al chasis y cubrir la mayor superficie posible de éste, ya que cuanto más estrecha y cerrada sea la moto, mayor coeficiente de penetración tendrá.

Requisitos generales:

- Todos los bordes y acabados del carenado deben ser redondeados, el radio mínimo es 1 mm.

- El carenado no podrá cubrir lateralmente al piloto a excepción de los antebrazos (esta excepción únicamente en posición de mínima resistencia).
- El carenado puede estar fabricado con cualquier tipo de material, no hay restricciones en este apartado.

#### 1) Carenado inferior

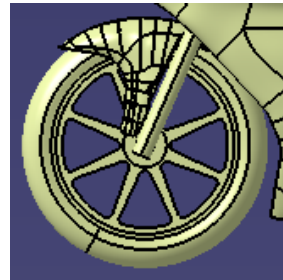
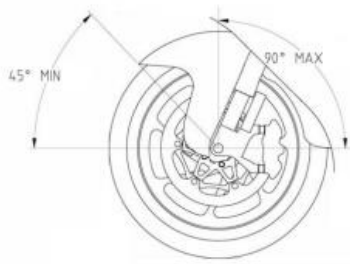
El carenado inferior o quilla sirve para contener, en caso de incidente en el motor, al menos la mitad del aceite del líquido refrigerante del motor. Además de cumplir con este requisito de seguridad permite cubrir una gran superficie de la moto uniéndolo con el carenado superior.

Esta parte del carenado debe incluir un agujero en su parte más baja de 25 mm de diámetro. Este agujero debe mantenerse tapado si se circula con pista seca y se debe abrir solo en caso de lluvia.

#### 2) Guardabarros

No es obligatorio el uso de guardabarros. En el caso de montar guardabarros, éste no puede cubrir más de  $135^\circ$  de la circunferencia del neumático medido desde la parte posterior del neumático con origen del ángulo en la horizontal que pasa por el eje de la rueda. Las restricciones que se aplican al guardabarros se observan con más detalle en la Figura 3.15 (a).

La instalación de un guardabarros puede suponer una mejora aerodinámica notable, sería interesante realizar un estudio de la influencia del guardabarros sobre el coeficiente de arrastre, para comprobar que se aumenta la eficiencia aerodinámica de la moto. En este proyecto, la moto original que se consiguió como archivo de CAD, realizada por alumnos que participaron en anteriores ediciones, empleaba un guardabarros delantero (Figura 3.15 (b)). Aunque para posteriores estudios realizados en diferentes posiciones del piloto, se desinstaló debido a que surgían errores al cargarlo mediante el programa XFlow™.



a) Restricciones guardabarros [6 ]

b) Guardabarros moto original

**Figura 3.15** Guardabarros

La llanta posterior no se podrá cubrir en más de 180°.

### 3) Protección frente al atrapamiento

Si el basculante no cubre la zona inferior de la cadena o correa de transmisión, se debe instalar un protector que prevenga contra atrapamientos entre el recorrido inferior de la cadena o correa y la corona de transmisión.

#### 3.4.5. Sistema de suspensión

La suspensión es un apartado importante en el rendimiento aerodinámico de una moto, ya que junto con el reparto de pesos, son los encargados de transferir las cargas tanto al eje delantero como trasero de la moto. Al frenar o acelerar se puede sentir como la carga en uno de los neumáticos se reduce mientras que en el otro aumenta, esta transferencia de carga varía de una moto a otra.

Las motocicletas tienen un centro de gravedad relativamente alto frente a la distancia entre ejes, provocando mayores efectos de transferencia de cargas que en otro tipo de vehículos.

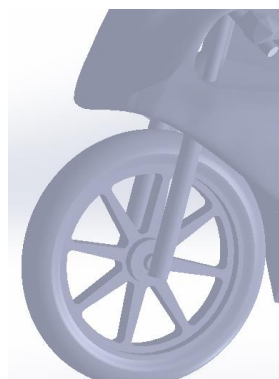
La suspensión sufre las mayores compresiones durante la aceleración y frenada. En aceleración sufre una compresión la suspensión trasera, la fuerza de resistencia aerodinámica tiende a levantar la parte delantera de la moto, mientras que la frenada produce una compresión en la suspensión trasera.

Cabe destacar que algunos equipos de MotoGP™ han tratado de solucionar el problema de la tendencia al levantamiento del eje delantero mediante la implantación de mejoras aerodinámicas, las cuales consisten en pequeños alerones ubicados en la zona delantera del carenado, que anulan el momento de vuelco generado en la aceleración. Estos alerones a su vez proporcionan una mayor adherencia del eje delantero en las frenadas. Se pueden observar las alas dobles empleadas por el equipo Ducati™ en la Figura 3.16.



**Figura 3.16** *Ducati™ MotoGP™ con alerones delanteros*

En este proyecto no se van a tener en cuenta las compresiones que pueda sufrir la suspensión, debido a la complejidad que supondría diseñar el conjunto de la motocicleta con una suspensión real, así como la dificultad de introducir estos archivos en el software CFD. Por tanto, la suspensión de la moto formará parte del chasis y carenado de la moto como un elemento fijo, tal y como se muestra a continuación (Figura 3.17).



**Figura 3.17** *Detalle suspensión delantera*



Están prohibidos los sistemas de suspensión activos o semi-activos, así como controles electrónicos de cualquier parámetro de la suspensión, incluyendo aquellos que controlen la regulación de altura.

Los reglajes de suspensión sólo pueden realizarse de manera manual y mediante ajustes mecánicos o hidráulicos.

1) Suspensión delantera

Está permitido el uso de cualquier tipo de suspensión delantera. Los amortiguadores de la suspensión delantera no pueden ser de tipo presurizado (con precarga de aire/gas) y no pueden montar botellas o depósitos exteriores.

En el caso de utilizar suspensión delantera de tipo horquilla (convencional o invertida), éstas deberán permitir únicamente el ajuste de precarga de muelle.

2) Suspensión trasera

Los amortiguadores de la suspensión trasera no pueden ser de tipo presurizado (con precarga de aire/gas y no pueden montar botellas o depósitos exteriores.

3.4.6. Llantas

La Organización suministra las llantas de uso obligatorio (Marchesini modelo M10RS KOMPE Moto3), con las siguientes medidas:

- Llanta delantera: 2,5"x17"
- Llanta trasera: 3,5"x17"

No se permite la mecanización ni adaptación de las llantas suministradas por la Organización, ni siquiera en los alojamientos del eje. Aunque estas llantas no pueden ser modificadas, uno de los apartados de este proyecto se centrará

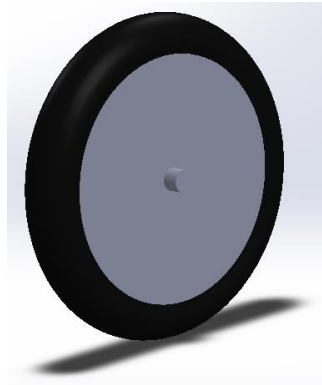
en estudiar la aerodinámica de estos elementos, así como la búsqueda de posibles mejoras que se podrían implantar.

Uno de los elementos sobre los que se profundizará en la búsqueda de mejoras aerodinámicas, normalmente son piezas que constan de varios radios. Las diferentes formas que puede tener una llanta son principalmente desarrolladas y diseñadas para obtener una estética atractiva para el vehículo que las monta. Sin embargo, estos diseños son poco efectivos en términos de aerodinámica, más concretamente, en la reducción del coeficiente de arrastre. A continuación se muestra la rueda delantera de la moto (Figura 3.18).



**Figura 3.18** *Detalle rueda delantera original de la moto*

Para obtener el menor coeficiente posible en una llanta, la solución se obtendría tapando estos radios mediante una tapa completamente cerrada sobre la llanta (una solución similar a los tapacubos, pero sin agujeros) o directamente realizando una llanta que no tuviese radios, sino una superficie circular cerrada a cada lado de la llanta. El resultado sería parecido a una rueda lenticular usada por los ciclistas en pruebas de contrarreloj, pero adaptándola a una rueda de moto. Como se observa en la Figura 3.19 se trata de eliminar las turbulencias generadas por los radios de la llanta.



**Figura 3.19** *Rueda lenticular*

En este proyecto se realizarán ensayos con estos dos tipos de llanta en diferentes situaciones que pueden ocurrir durante una carrera, comprobando como se reduce el coeficiente de arrastre y estudiando posibles efectos que puede producir el viento soplando lateralmente, para verificar si la mejora instalada plasmaría una mejora en el tiempo por vuelta.



## **4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**



## 4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se van a estudiar los fundamentos teóricos que intervienen en el campo de la aerodinámica, se parte de los conceptos básicos y de una serie de suposiciones que simplificarán los cálculos, estudiados en las asignaturas “Ingeniería de Fluidos” [7] y “Aerodinámica” [8], ampliando información con el libro de Houghton, E.L. et al [1]. Además, se profundizará en el análisis dimensional, explicando la importancia que tiene el número de Reynolds, así como la obtención de los principales coeficientes aerodinámicos. Estos apartados permitirán obtener una base para el entendimiento de los diferentes aspectos que se deben tener en cuenta a la hora de llevar a cabo un estudio aerodinámico.

### 4.1. Conceptos básicos y suposiciones

Las propiedades termodinámicas presión, temperatura y densidad, se suponen como propiedades de una partícula de aire en una posición  $(x, y, z)$  y un instante de tiempo,  $t$ . Se asume también que el volumen de la partícula es suficientemente pequeño como para ser considerado un punto.

- Hipótesis de continuidad

Este estudio se centra en un punto de vista macroscópico, por tanto se puede aceptar esta hipótesis permite definir todas las propiedades del flujo como funciones continuas deposición y tiempo. Este concepto del medio continuo permite una gran simplificación de los cálculos y análisis.

Para desarrollar la teoría, los principios fundamentales de la mecánica de fluidos asumidos son:

- 1) Conservación de la masa: El sistema es una cantidad fija de masa. Por tanto, la masa del sistema no cambia.
- 2) Segunda Ley de Newton: Expresa la masa que comienza a acelerarse si el medio ejerce una fuerza resultante sobre el sistema.

- 3) Ley de conservación del momento cinético: Si el entorno ejerce un momento resultante sobre el centro de masas del sistema, se producirá una rotación.
- 4) Primera Ley de la Termodinámica: Relaciona el trabajo y el calor intercambiado en un sistema a través de una variable llamada energía interna o energía del sistema. Esta energía ni se crea ni se destruye, solo se transforma.
- 5) Segunda Ley de la Termodinámica: Relaciona los cambios de entropía con el calor aportado y la temperatura absoluta.

## 4.2. Análisis dimensional

Técnica para estudiar el flujo de los fluidos. Mediante la predicción de como una variable puede depender de otras, esa variable se puede usar para planificar un experimento, analizar resultados experimentales o minimizar esfuerzo computacional.

El análisis dimensional tiene tres aspectos importantes:

- 1) Permite reducir el número y complejidad de variables que describen un fenómeno físico. Si en un experimento intervienen  $n$  variables independientes, mediante el análisis dimensional, se reducen a  $n-k$  variables independientes, siendo  $k$  las variables adimensionales.
- 2) Permite obtener formas adimensionales de las ecuaciones.
- 3) Proporciona las leyes de escala, que pueden convertir los datos obtenidos sobre un modelo a pequeña escala, en información para el diseño del prototipo a gran escala.



#### 4.2.1. Principio de homogeneidad dimensional

Una ecuación que exprese un proceso físico, para considerarla dimensionalmente homogénea, debe tener las dimensiones de ambos lados de la ecuación iguales.

Por ejemplo, para encontrar las dimensiones de la fuerza, se usa la Segunda Ley de Newton (Ecuación 4.1):

$$\text{Fuerza} = \text{masa} \times \text{aceleración}$$

**Ecuación 4.1**

Para saber a qué unidades fundamentales equivale el Newton (N), hay que expresar los factores en dimensiones fundamentales (M= masa, L= longitud, T= tiempo), la simplificación a dimensiones fundamentales se observa en la Ecuación 4.2:

$$\text{Fuerza} = [N] = [M] \times [LT^{-2}] = [MLT^{-2}]$$

**Ecuación 4.2**

El análisis dimensional tiene una función importante, ya que permite escribir cualquier ecuación dimensionalmente homogénea en una forma equivalente y adimensional.

#### 4.2.2. Número de Reynolds

Constituye un parámetro adimensional mediante el cual se puede conocer el estado de un flujo, la expresión del número de Reynolds se muestra en la Ecuación 4.3.

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu}$$

**Ecuación 4.3**

*L*: Longitud característica

*U*: Velocidad del flujo

*ν*: Viscosidad cinemática

Este parámetro es fundamental a la hora de diseñar los prototipos, con el fin de ahorrar costes, se utilizan modelos a escala. Para asemejar el modelo al prototipo, se utilizan los parámetros adimensionales, que deben ser iguales para corroborar que se realicen correctamente los ensayos y estudios sobre el modelo.

#### 4.2.3. Teorema de Pi Buckingham

Método que permite obtener grupos adimensionales cuando se cuenta con pocas ecuaciones y muchas variables.

El teorema dice que si un proceso físico cumple el principio de homogeneidad dimensional, cualquier grupo de  $n$  variables dimensionales se puede describir mediante una relación entre sólo  $k$  variables adimensionales.  $(n - k)$  es el máximo número de parámetros adimensionales que describen completamente el problema y es siempre menor o igual que el número de dimensiones que describen estas variables.

#### 4.2.4. Semejanza

Las condiciones del flujo de un ensayo para un modelo de ensayo son completamente semejantes a las del prototipo si los valores correspondientes al modelo y prototipo coinciden para todos los parámetros adimensionales.

1. Semejanza geométrica: Se refiere a la dimensión longitud. Un modelo y un prototipo son semejantes geoméricamente si todas las dimensiones espaciales en las tres coordenadas tienen la misma relación lineal.
2. Semejanza cinemática: Todas las relaciones entre longitudes homólogas del modelo y prototipo deben tener el mismo valor, es decir, los movimientos de dos sistemas son semejantes

cinemáticamente si partículas homólogas alcanzan puntos homólogos en instantes homólogos.

3. Semejanza dinámica: Esta semejanza se cumple cuando el modelo y el prototipo tienen la misma relación de escala de longitudes, misma relación de escala de tiempos y misma relación de escala de fuerzas.

En este proyecto, se trata de un fluido incompresible sin superficie libre, por lo tanto, si el número de Reynolds del modelo y del prototipo son iguales, se puede asegurar la semejanza dinámica existe simultáneamente con la semejanza cinemática, ya que todas las fuerzas del modelo y del prototipo tienen la misma proporción.

#### 4.2.5. Análisis dimensional aplicado a la fuerza aerodinámica

Para comenzar el análisis dimensional hay que conocer de qué variables depende la fuerza aerodinámica ( $F$ ):

- 1) Densidad ( $\rho$ )
- 2) Viscosidad cinemática ( $\nu$ )
- 3) Velocidad del flujo ( $V$ )
- 4) Módulo de compresibilidad ( $K$ )
- 5) Dimensión básica ( $D$ )

$$F = f(V, D, \rho, \nu, K)$$

**Ecuación 4.4**

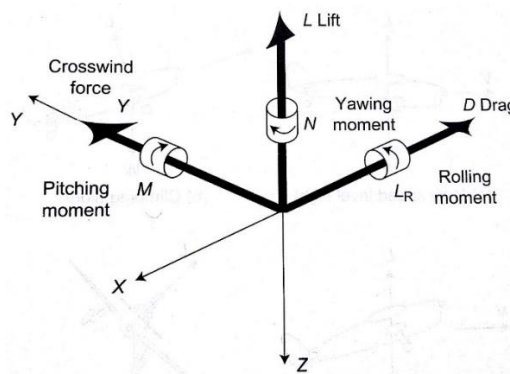
#### 4.2.6. Fuerza y momento aerodinámicos

En un estudio aerodinámico de cualquier objeto, la fuerza y momento aerodinámicos se producen debido a:

- La distribución de presiones en la superficie del objeto.
- La distribución de los esfuerzos cortantes en la superficie del cuerpo debidos a la viscosidad del aire.

Si la fuerza y el momento aerodinámico se separan en cada una de sus tres componentes, se definen tres fuerzas y tres momentos (Figura 4.1):

- 1) Lift (Sustentación)(L)
- 2) Drag (Arrastre)(D)
- 3) Crosswind force (Fuerza del viento de costado)(Y)
- 4) Pitching moment (Momento de cabeceo)(M)
- 5) Rolling moment (Momento ondulante)( $L_R$ )
- 6) Yawing moment (Momento de guiñada)(N)



**Figura 4.1** Fuerzas y momentos aerodinámicos [1]

En la imagen anterior la dirección de movimiento del cuerpo es la del eje X. En este proyecto solo se tendrán en cuenta la sustentación, el arrastre y el momento de cabeceo.

- Lift (Sustentación)(L)

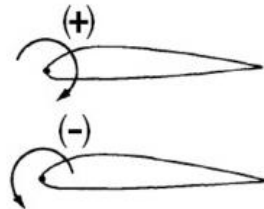
Es la componente de la fuerza que actúa hacia arriba, perpendicular a la dirección del flujo imperturbable.

- Drag (Arrastre)(D)

Es la componente de la fuerza que actúa en la misma dirección y sentido del flujo. Es la fuerza que se opone al movimiento del cuerpo dentro del fluido.

- Pitching moment (Momento de cabeceo)(M)

Es el momento que actúa en el plano que contiene a la sustentación y al arrastre. Se toma positivo si tiende a incrementar el ángulo de ataque, tal y como se observa en la Figura 4.2.



**Figura 4.2** Sentido momento de cabeceo [1]

#### 4.2.7. Coeficientes de fuerza y momento

Al comienzo del apartado de análisis dimensional se calculó la expresión no dimensional de la fuerza, también llamado coeficiente de fuerza (Ecuación 4.5):

$$\frac{F}{\rho V^2 D^2} \rightarrow \frac{F}{\rho V^2 S}$$

**Ecuación 4.5**

Donde  $F$  es la fuerza aerodinámica y  $S$  la superficie de referencia.

Para fluidos incompresibles se usa la expresión de la presión dinámica del fluido lejos del cuerpo ( $\frac{1}{2}\rho V^2$ ), en lugar de  $\rho V^2$ . Por lo tanto, el coeficiente de fuerza aerodinámica se define como se muestra en la Ecuación 4.6:

$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho V^2 S}$$

**Ecuación 4.6**

Por tanto se pueden obtener fácilmente los coeficientes de Lift (sustentación) y Drag (arrastre), mostrados en la Ecuación 4.7 y Ecuación 4.8:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 S}$$

**Ecuación 4.7**

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 S}$$

**Ecuación 4.8**

Los momentos aerodinámicos también se expresan en forma de coeficientes aerodinámicos, la forma no dimensional del momento es (Ecuación 4.9):

$$\frac{Q}{\rho V^2 S l}$$

**Ecuación 4.9**

Donde Q es el momento aerodinámico, S el área de referencia y l la longitud de referencia.

De nuevo, para el cálculo de momentos en fluidos incompresibles, se usa la presión dinámica del fluido lejos del cuerpo, como se muestra en la Ecuación 4.10:

$$C_Q = \frac{Q}{\frac{1}{2}\rho V^2 S l}$$

**Ecuación 4.10**

En este caso solo hace falta definir el coeficiente del momento de cabeceo (Pitching moment) (Ecuación 4.11):

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho V^2 S l}$$

**Ecuación 4.11**

La superficie de referencia (S) en automóviles y motos superficie de referencia es área frontal y la longitud de referencia (l), varían dependiendo el tipo de objeto que se estudie, pero siempre se debe saber a qué se refieren.

#### 4.2.8. Centro aerodinámico

Si se calcula el coeficiente del momento de cabeceo para varios valores de  $C_L$ , se encuentra un punto para el cual el  $C_M$  es virtualmente constante e independiente del coeficiente de sustentación. Este punto se denomina centro aerodinámico.

#### 4.2.9. Centro de presiones

Las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre un objeto inmerso en aire, se pueden representar con la sustentación (Lift), arrastre (Drag) y momento de cabeceo (Pitching moment). Para cada valor del  $C_L$ , habrá un punto donde  $C_M = 0$  y los efectos aerodinámicos se podrán representar únicamente con la sustentación y arrastre. Este punto se denomina centro de presiones.

Mientras que el centro aerodinámico es fijo y se sitúa dentro de la sección del ala u objeto a estudiar, el centro de presiones se mueve conforme cambia el coeficiente de sustentación.





## **5. AERODINÁMICA DE LA MOTO**



## 5. AERODINÁMICA DE LA MOTO

La aerodinámica es un aspecto fundamental de una motocicleta, intervienen tanto el tamaño y la forma de la moto, como el piloto, así como diferentes elementos que permitan ayudar a mejorar el rendimiento aerodinámico. Como se explicó anteriormente, a partir de la fuerza que un fluido ejerce sobre un objeto rodeado por este fluido, se obtienen tres coeficientes aerodinámicos:

- Coeficiente de drag (Arrastre)
- Coeficiente de lift (Sustentación)
- Coeficiente de momento de cabeceo (Pitching moment)

Para la explicación de estos tres coeficientes aplicados a la motocicleta, se empleó el libro de Tony Foale [2]. El coeficiente de arrastre de una moto es el más importante, y sobre el que tratan la mayoría de estudios y ensayos, ya que determina la penetración que tiene una moto con respecto al aire y por tanto está relacionado con la velocidad máxima que puede alcanzar, así como la potencia necesaria para superar esta resistencia que opone el aire.

A su vez en este apartado se profundizará en la mejora aerodinámica planteada para este proyecto, explicando donde se inició la idea, los posibles beneficios que aporta y el estudio que será necesario realizar para comprobar que las mejoras se cumplen.

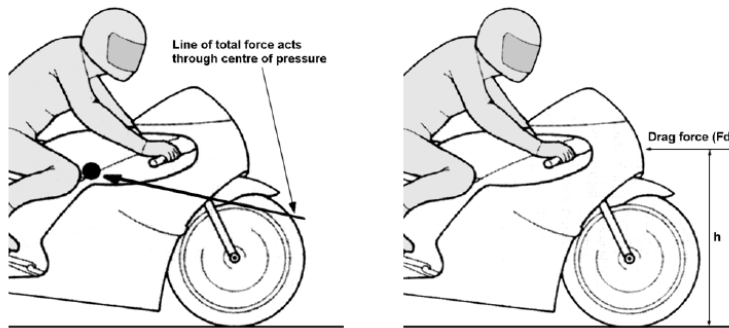
### 5.1. Drag

El drag o arrastre es la fuerza que se opone al movimiento de la moto a través del aire, esta fuerza se genera por una diferencia de presiones entre la parte frontal y trasera de la moto, está relacionada con la viscosidad del aire, ya que si el aire no tuviese viscosidad, la fuerza de arrastre sería igual a cero.

La fuerza de arrastre es proporcional al área frontal del vehículo, por lo que si se duplica el área, se duplicará el arrastre así como la potencia necesaria para superar esta fuerza. Sin embargo, el efecto de la velocidad sigue una ley

cuadrática, esto quiere decir que si se duplica la velocidad, se cuadruplica el arrastre.

Existe un momento de vuelco generado por la fuerza de arrastre, debido a que al aplicar esta fuerza sobre el centro de presiones de la moto, ésta genera una reducción considerable de la carga sobre el eje delantero y un aumento en el eje trasero, en la Figura 5.1 se puede observar cómo actúan la fuerza total que ejerce el viento sobre la moto, así como la componente horizontal o fuerza de drag.



**Figura 5.1** Centro de presiones en una moto [2]

Actualmente algunos equipos de MotoGP™ están desarrollando diferentes mejoras aerodinámicas. Los más conocidos son los alerones que se colocan en la parte delantera del carenado y reducen el momento que tiende a levantar la moto sobre la rueda trasera, estos alerones están configurados para que no intervengan de manera positiva ni negativa en las curvas, ejerciendo su función únicamente en la aceleración en recta, en la Figura 5.2 se pueden observar los cuatro alerones delanteros instalados en el carenado de la Ducati™.



**Figura 5.2** Ducati™ MotoGP™ con alerones delanteros

A continuación se muestran varios valores del coeficiente de arrastre calculados en diferentes modelos de motocicletas, en este caso, estos valores están multiplicados por el área frontal de cada moto (Figura 5.3).

Description of bike	Rider prone	Rider sitting
Yamaha Venture		0.75
Honda V65 Magna		0.61
Honda Blackbird	0.44 / 0.49	0.72 / 0.81
Honda VF1000F	0.40	0.46 / 0.45
Aprilia Mille	0.52	0.61
Ducati 916	0.49 / 0.57 / 0.53	0.61 / 0.69 / 0.61
BMW R1100 RT	0.53	0.97
BMW K100RS	0.40	0.43
Yamaha R1 (1998)	0.57	0.62
Yamaha FJ1100	0.43	0.48
Kawasaki GPZ900R	0.36	0.43
Suzuki GSX1100EF	0.41	0.44
Suzuki GSXR750	0.32	
Suzuki Hayabusa	0.31	
Kawasaki ZX-12R	0.34	
Yamaha OW69	0.32	
Honda 1996 RS125	0.20	
Honda 1990 RS125	0.19	
Honda RS500	0.24	
Rifle faired Yamaha	0.15	

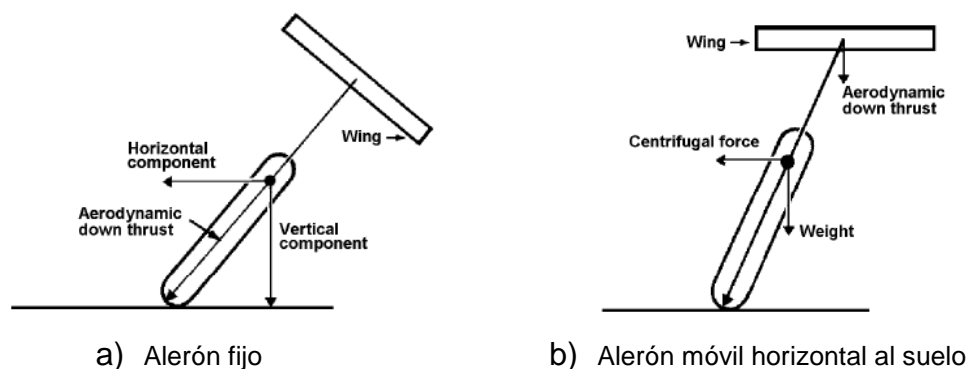
**Figura 5.3** Coeficientes de arrastre para diferentes modelos de motocicletas [2]

En este proyecto, la moto con la que se trabaja es una Honda™ RS125. Se observa en la tabla que el valor del coeficiente de arrastre por el área frontal debe estar comprendido entre valores de 0.19 – 0.2, con el piloto en una posición tumbada, es decir, posición de menor resistencia. Este valor se utilizará para obtener el modelo base sobre el que se trabajará en XFlow™, con éste se deberá obtener un valor similar al proporcionado por la tabla para poder validarlo y comenzar a realizar las simulaciones correspondientes.

## 5.2. Lift

Es la componente vertical de la fuerza que genera el aire, dependiendo de su dirección se denomina lift (sustentación) o down-force. Las motocicletas generan sustentación, este efecto provoca una reducción de la carga en las ruedas, por lo tanto se reduce el grip con el asfalto.

En general este coeficiente está más relacionado con el ámbito de la competición y no se estudia tanto como el coeficiente de arrastre, debido a la dificultad para colocar alerones de manera correcta. En las curvas del circuito, si la configuración de los alerones no es correcta, se posicionan en una dirección no paralela al suelo, pudiendo generar fuerzas horizontales que generan un comportamiento anómalo de la moto, tal y como se muestra en la Figura 5.4.



**Figura 5.4** Efectos producidos por dos configuraciones de alerones [2]

Se observa que la diferencia entre las dos imágenes anteriores consiste en que un ala es fija a la moto y la otra se mueve, manteniéndose horizontal al suelo. En las rectas del circuito, ambos modelos permiten obtener una mayor tracción en aceleración y en frenada. Los efectos del ala fija en curva pueden ser nulos o negativos en función de la inclinación de la moto y del ángulo de la curva. En cambio, el ala móvil, al permanecer siempre horizontal, puede mejorar la tracción y el grip en el paso por curva.

### 5.3. Mejora aerodinámica

En este proyecto se busca estudiar la aerodinámica de una moto de competición en diferentes situaciones de carrera, instalando una mejora aerodinámica y comparando los resultados entre la moto sin la mejora y la moto con la mejora, para comprobar si este elemento mejorará el comportamiento de la moto y permitirá reducir el tiempo por vuelta.

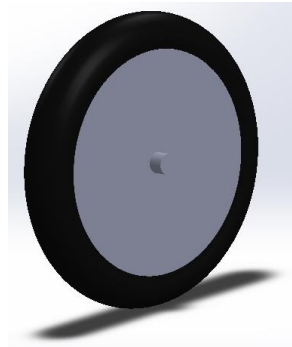
Como se ha explicado en el apartado 5.1. Ducati™ instaló unos alerones en su carenado que mejoraban la estabilidad de la moto en aceleraciones, reduciendo el momento que tiende a levantar la moto. Una prueba que realizó este equipo italiano fue instalar una llanta lenticular en su rueda trasera (Figura 5.5), que tenía como objetivos disminuir el arrastre producido por la moto, así como acelerar el calentamiento de la goma trasera para obtener el máximo agarre.



**Figura 5.5** Rueda lenticular trasera Ducati™ MotoGP™

Esta solución será la que se lleve a cabo en este proyecto, analizando su comportamiento en diferentes situaciones que se producen en una carrera, determinando aspectos positivos y negativos que se produzcan en cada situación. Con este estudio se podrá decidir si es un elemento que proporcionará una mejora en el tiempo por vuelta y por tanto si es viable su instalación y desarrollo.

En la Figura 5.6 se muestra el diseño realizado para este proyecto, al no contar con disco ni pinza de freno, se ha cerrado completamente la llanta lenticular. En un estudio real habría que tener en cuenta la dimensión del disco y de la pinza, aunque podría estudiarse la manera de separarlos de la llanta, permitiendo un cerramiento total de esta.



**Figura 5.6** *Mejora aerodinámica. Rueda lenticular*



## **6. DISEÑO EN CAD**



## 6. DISEÑO EN CAD

El equipo de Motostudent de la Universidad cuenta con el carenado de la moto que participó en la primera edición de la competición en 2010, debido a la falta de presupuesto se ha decidido que ese carenado será usado por la moto de 2016. Por tanto, para comenzar este Trabajo de Fin de Grado, es necesario conseguir el archivo digitalizado del carenado, ya que tiene una superficie muy compleja. Solamente diseñar un carenado y construirlo en un programa de diseño podría equivaler a un Trabajo de Fin de Grado, por otra parte, el resto de componentes de la moto necesarios para realizar el estudio aerodinámico podrían ser diseñados por su mayor simpleza, el proyecto se va a centrar en el estudio de una Honda™ RS125 como la que se ve en la Figura 6.1.



a) Carenado Honda™ RS125



b) Honda™ RS125

**Figura 6.1** Honda™ RS125

### 6.1. Digitalización de las piezas

Mediante ingeniería inversa se pueden obtener representaciones tridimensionales de piezas a partir de unas piezas originales, pero la digitalización de piezas es un proceso muy complejo. Hay varias técnicas desarrolladas para la digitalización de piezas y generación de archivos CAD, cuya información se recoge en las páginas web [10] y [11]:

#### 6.1.1. Palpadores

Utilizados en las Máquinas de Medición de Coordenadas (CMM), utilizan técnicas de contacto para adquirir una serie de puntos de la pieza determinando

sus coordenadas XYZ. Dependiendo de la complejidad de la pieza, la máquina adquirirá más o menos puntos.

Hay dos maneras de realizar la medición de coordenadas:

1. El primer método es el palpado punto a punto, esta técnica es apropiada para medir piezas con formas simples, que requieren un número pequeño de puntos de palpado. No es eficaz para medir piezas con formas libres.
2. La segunda técnica consiste en un movimiento continuo del palpador sobre la pieza, la máquina envía una secuencia ininterrumpida de datos al ordenador. La Universidad Pública de Navarra cuenta con una máquina de coordenadas, como la que se muestra en la Figura 6.2 que permitiría obtener un modelo digital del carenado con cualquiera de las dos técnicas, pero sería un proceso muy lento y complejo.



a) Máquina de coordenadas



b) Tipos de palpadores

**Figura 6.2** Máquina de coordenadas y tipos de palpadores

### 6.1.2. Escáner 3D

También llamados palpadores sin contacto o palpadores ópticos, se pueden utilizar en Máquinas de Medición de Coordenadas, el procedimiento consiste en lanzar un haz de luz láser a la pieza, una o varias cámaras estudian cómo se deforma el haz y el ordenador transforma esa deformación en

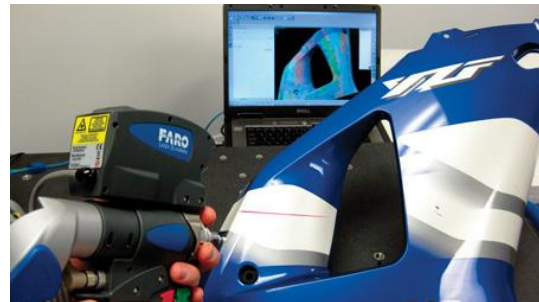
coordenadas XYZ y genera una nube de puntos en 3D. Es la técnica más usada actualmente debido a su mayor precisión y velocidad de adquisición de datos.

Actualmente también existe software que es capaz de interpretar la información obtenida con rayos X.

La Universidad Pública de Navarra cuenta en el campus de Tudela con un escáner laser que permite medir y digitalizar piezas pequeñas. En la Figura 6.3 se puede observar tanto un instrumento de escáner 3D como la medición de una pieza con este método de ingeniería inversa.



a) Escáner 3D

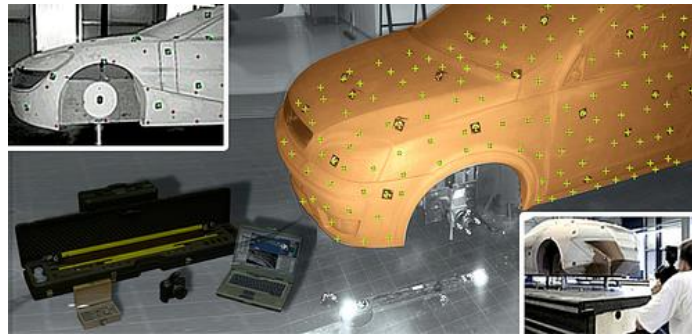


b) Medición de pieza con escáner 3D

**Figura 6.3** Escáner 3D y ejemplo de medición

### 6.1.3. Fotogrametría

Es una técnica usada principalmente en cartografía pero que se ha ido introduciendo en la medición de piezas industriales. Obtiene la geometría de un objeto mediante la reconstrucción digital de una pieza a partir de una o varias fotografías. Utiliza relaciones matemáticas establecidas en la geometría proyectiva. En la Figura 6.4 se muestra una medición de la carrocería de un vehículo mediante fotogrametría para obtener el archivo digital que permita visualizarlo en el ordenador.



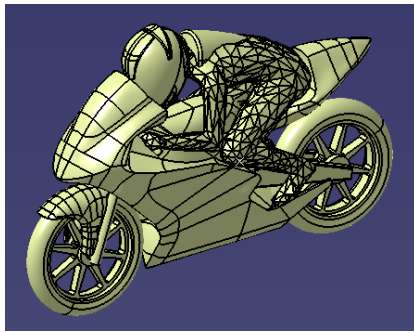
**Figura 6.4** Digitalización de carrocería mediante fotogrametría

La Universidad Pública de Navarra cuenta con una máquina de coordenadas con palpadores, con la que se podría medir la geometría del carenado pero como ya ha comentado anteriormente, es un proceso complejo que podría equivaler a realizar un Trabajo de Fin de Grado.

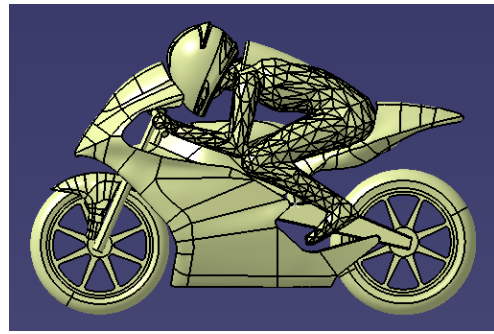
Asimismo, la Universidad cuenta con un escáner 3D en el campus de Tudela, que sirve para medir piezas pequeñas. Esta segunda alternativa plantearía construir una maqueta a escala del carenado, lo cual continúa siendo una tarea complicada, que no garantizaría unos resultados geométricos conforme al carenado original.

## 6.2. Desarrollo y modificación de los archivos de CAD

Gracias a la participación en Motostudent, se tuvo acceso a una serie de documentos y archivos referentes a anteriores ediciones de la competición, concretamente un archivo CAD de la moto que participó en la edición de 2010 desarrollado por Unai Zabala en su Trabajo de Fin de Carrera [3]. Se trata de una Honda™ RS125 de 1996 (Figura 6.5).



a) Honda™ RS125



b) Honda™ RS125 vista lateral

**Figura 6.5** Archivo CAD Honda™ RS125

Una vez obtenido este archivo, se hicieron pruebas de funcionamiento en el programa de simulación XFlow™, que será el programa usado para realizar las simulaciones de túnel de viento virtual. El archivo original funcionaba correctamente en el programa y no daba ningún error.

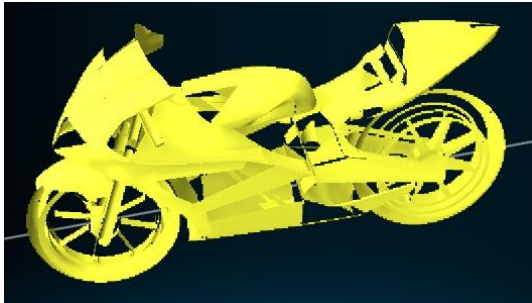
Por otra parte, el archivo contenía varios sólidos, entre los que se encontraban las ruedas, el guardabarros y el carenado junto con el piloto. Para la realización de las diferentes pruebas aerodinámicas de este proyecto, era necesario separar cada uno de los sólidos e incluso crear diferentes posturas para el piloto, puesto que se va a llevar a cabo un estudio de la motocicleta en diferentes circunstancias.

Hay que añadir que la moto, incluyendo al piloto, formaba una superficie única. Esto supuso problemas a la hora de intentar separar los sólidos y cargarlos correctamente en el programa de simulación XFlow™.

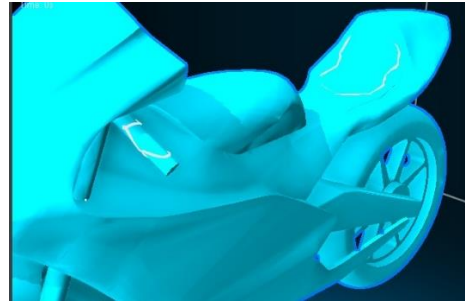
#### 6.2.1. 1ª Prueba. Carga de los archivos en XFlow™

Para conseguir separar los sólidos se utilizaron los programas Solidworks™ y Catia™, el archivo original tenía extensión “.igs”. Primero se intentó separar los sólidos en Solidworks™, pero este programa no es tan completo a la hora de trabajar con superficies como Catia™, por tanto, cuando

se exportaban los sólidos por separado a XFlow™, surgían errores debidos a agujeros en la superficie del sólido (Figura 6.6).



a) Error de carga en XFlow™, agujeros en todos los elementos



b) Grietas generadas en manillar y asiento

**Figura 6.6** Errores en los archivos al cargar en XFlow™

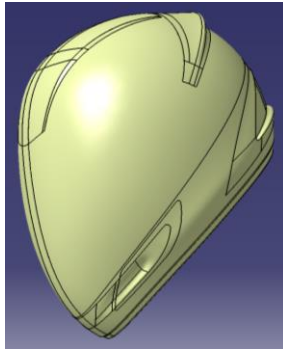
Estos agujeros que se formaban en la superficie del sólido son fatales para el programa XFlow™, puesto que al hacer una prueba simulando un túnel de viento, las partículas de viento que simula el programa y que pasan cerca del agujero, se desvían y no siguen la trayectoria que deberían. El resultado de la simulación por tanto no es correcto y no se asemeja a la realidad.

#### 6.2.2. 2ª Prueba. Reparación de las ruedas y casco

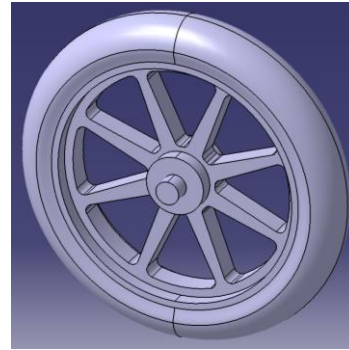
Para la segunda prueba se usó Catia™, este programa permite trabajar con superficies mejor que Solidworks™. Se siguieron diferentes estrategias para conseguir que cada sólido se pudiese cargar dentro del programa XFlow™, sin que apareciesen agujeros en las superficies de los sólidos.

Se consiguió separar cada rueda y el casco, para ello, se borraban las demás superficies y posteriormente se guardaba el archivo en “.igs” (Figura 6.7).





a) Archivo CAD casco



b) Archivo CAD rueda trasera

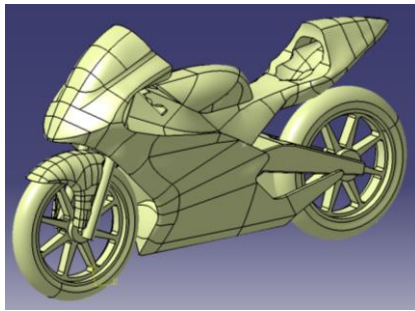
**Figura 6.7** Archivos CAD casco y rueda trasera

Seguían surgiendo agujeros cuando se cargaban los archivos en el programa XFlow™ con el formato “.igs”. Hay que añadir que el programa XFlow™ tiene la opción “Healing” (Curación) que permite arreglar agujeros de manera automática, pero al activarla, no resolvía ningún problema.

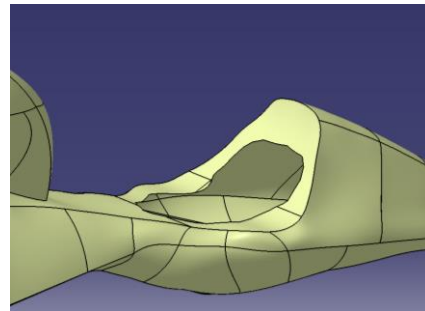
La estrategia que se siguió fue guardar los archivos en otras extensiones compatibles con Catia™ (“.stp”, “.CATpart”, “.model”), pero con todas surgían problemas cuando se ejecutaban en XFlow™. Se realizó lo mismo pero con extensiones compatibles con Solidworks™ (“.sldprt”, “.step”) y se observó que los archivos con extensión “.step”, se ejecutaban perfectamente en XFlow™.

### 6.2.3. 3ª Prueba. Reparación del carenado

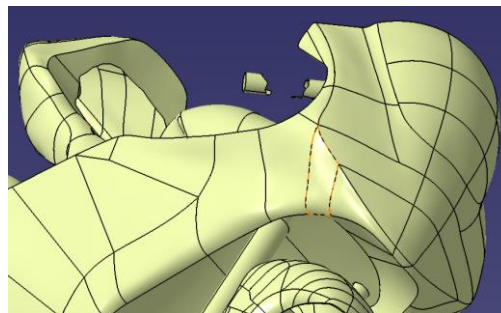
El principal problema que surgía al seguir el método anterior, era intentar separar el carenado del piloto, ya que al borrar la superficie que formaba el piloto, las partes que estaban en contacto con él (manillares y asiento), quedaban huecas, tal y como se muestra en la Figura 6.8.



a) Agujeros en manillar y asiento



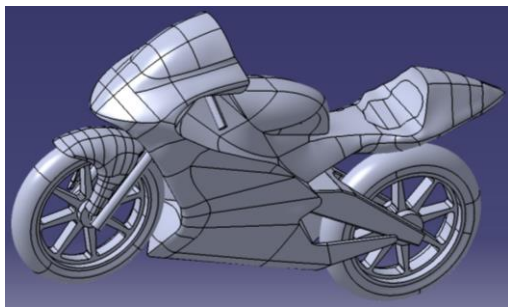
b) Detalle agujero en asiento



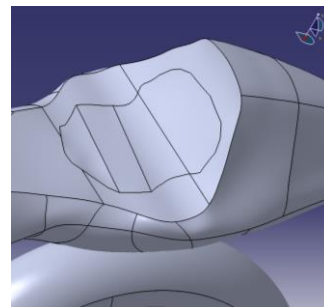
c) Detalle agujero en manillar

**Figura 6.8** *Agujeros producidos por la eliminación del piloto*

Para recubrir la zona del asiento, se utilizó la herramienta “*Fill*” (Llenar), que permite cubrir un contorno cerrado de una superficie (Figura 6.9).



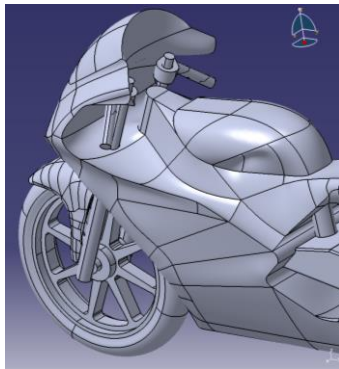
a) Moto con asiento reconstruido



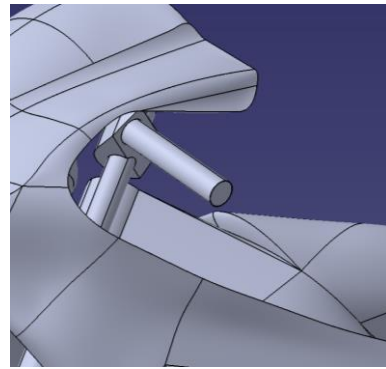
b) Detalle asiento reconstruido

**Figura 6.9** *Reconstrucción de los agujeros en el asiento*

Los manillares estaban parcialmente huecos, como se ha visto en imágenes anteriores, por tanto se volvieron a reconstruir utilizando la herramienta “*Extrude*” (Extruir), se realizaron dos cilindros con el diámetro original del manillar y se extruyeron, tal y como se observa en la Figura 6.10.



a) Moto con manillar reconstruido



b) Detalle manillar reconstruido

**Figura 6.10** Reconstrucción de los agujeros en el manillar

De nuevo, empleando el método expuesto en el punto anterior, se guardó el carenado con los agujeros cerrados en formato “.igs” y después ese archivo se ejecutó en Solidworks™ y se volvió a guardar, esta vez con formato “.step”. El resultado final del archivo CAD que contenía el carenado reconstruido se muestra en la Figura 6.11.



**Figura 6.11** Carenado reconstruido

#### 6.2.4. 4ª Prueba. Generación del piloto

Por último, había que construir varios pilotos, cada uno en una posición diferente de pilotaje (mínima resistencia, frenada y curva). Catia™ ofrece la posibilidad de confeccionar maniqués mediante la herramienta “Human Builder” (Generador de maniqués), permite crear un maniquí con un determinado peso y altura y posteriormente permite mover todas las articulaciones del cuerpo, con lo cual se puede adaptar perfectamente a la moto. Se seleccionó una altura del

piloto de 1,67 metros, para conseguir que se adaptase correctamente a la moto, se muestra en la Figura 6.12.



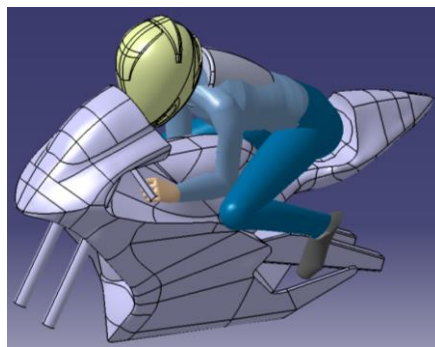
**Figura 6.12** Maniquí generado en Catia™

Una vez generado el maniquí, hay que proceder a colocarlo en la posición requerida encima de la moto. En primer lugar hay que cargar la moto junto con el piloto para tener una referencia sobre la que trabajar. Después se procede a mover y rotar el piloto para colocarlo sobre la moto, para realizar este procedimiento existe la herramienta “*Shuttle*” (Trasladar). A continuación, hay que colocar en el lugar adecuado las diferentes articulaciones del piloto, mediante la herramienta “*Posture editor*” (Editor de postura), se puede efectuar esta operación, el resultado de colocar al piloto en la posición de mínima resistencia aerodinámica se observa en la Figura 6.13.



**Figura 6.13** Piloto en posición de mínima resistencia aerodinámica

Se le añadió al piloto la típica joroba que llevan los monos de los pilotos de motos, que además de servir como protección para la espalda, sirven también para mejorar la resistencia aerodinámica, evitando que se produzca una separación del flujo una vez ha atravesado el casco. Esta zona es interesante en cuanto a su estudio aerodinámico. En la Figura 6.14 se puede observar al piloto equipado con el casco y la joroba, ubicado en la posición que ocupa en la moto cuando se encuentra en una recta y necesita la mínima resistencia aerodinámica.



**Figura 6.14** *Piloto equipado con casco y joroba*

Catia™ no permite guardar el maniquí original, para solucionar esto, se recurrió a la herramienta “Wrapping” (Recubrir), que consiste en realizar un “envoltorio” o superficie del maniquí mediante triángulos “Tesellation”, dependiendo del tamaño de triángulo que se escoja, el archivo se asemejará más o menos al original, la diferencia de precisión a la hora de realizar el maniquí adecuado se observa claramente en la Figura 6.15.



a) Maniquí mallado grueso

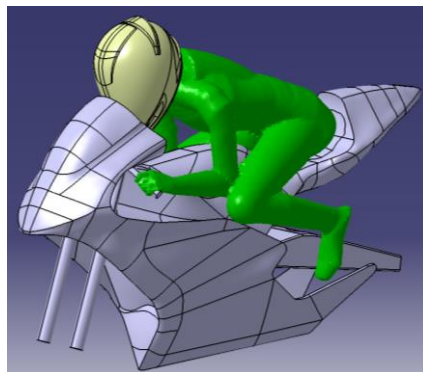


b) Maniquí mallado fino

**Figura 6.15** *Creación de maniquís con diferente precisión*

En las dos imágenes anteriores se puede apreciar la diferencia que existe al realizar diferentes recubrimientos al mismo piloto, conforme más fino se realiza este recubrimiento, se obtiene una forma más semejante al maniquí creado. El inconveniente que aparece es que conforme más fino es el recubrimiento, mayor memoria ocupa el archivo, por tanto habrá que seleccionar un tamaño fino de recubrimiento pero evitando un excesivo uso de memoria.

El piloto hay que guardarlo con extensión “.stl”. XFlow™ abre sin problemas esta extensión y aunque la forma del piloto queda algo distorsionada, será la estrategia a seguir para crear las diferentes posiciones en las que estará el piloto, en la Figura 6.16 se observa la configuración final que se empleará a la hora de cargar archivos en XFlow™, los elementos de la moto se guardarán con extensión “.step” y el piloto se guardará con extensión “.stl”.



**Figura 6.16** Configuración final del piloto en posición de mínima resistencia

## **7. XFLOW™**





## 7. XFLOW™

XFlow™ es un programa de CFD (Computational Fluid Dynamics) diseñado para el análisis en ingeniería, utiliza un enfoque totalmente Lagrangiano que permite resolver problemas de aerodinámica, fluidos con superficie libre o interacciones fluido-estructura. Este programa es uno de los múltiples software CFD que existen en el mercado, tales como “Fluent™” o “Star CCM+™”.

Este proyecto se va a realizar con este software porque ofrece una gran capacidad de cálculo y una interfaz sencilla de manejar. Cabe destacar que se hizo uso de unos ordenadores con potencia limitada que no permiten sacar el máximo rendimiento del programa, limitando el número de elementos en los que se divide la malla y por tanto haciendo menos precisas las diferentes simulaciones que se llevaron a cabo. Para realizar algún ensayo más detalladamente se permitió el acceso a una estación de cálculo, ésta cuenta con 24 procesadores, que permiten un menor tiempo de cálculo, así como una tarjeta gráfica más potente con la que se pueden observar más detalles en la ventana gráfica de resultados.

### 7.1. Interfaz gráfica

A continuación se describirá la interfaz gráfica (Figura 7.1) que ofrece XFlow™, se divide en 8 bloques:

1. Main menu
2. Toolbar
3. Project tree
4. Message view
5. Graphic view
6. Function viewer
7. Transform tool
8. Time controls

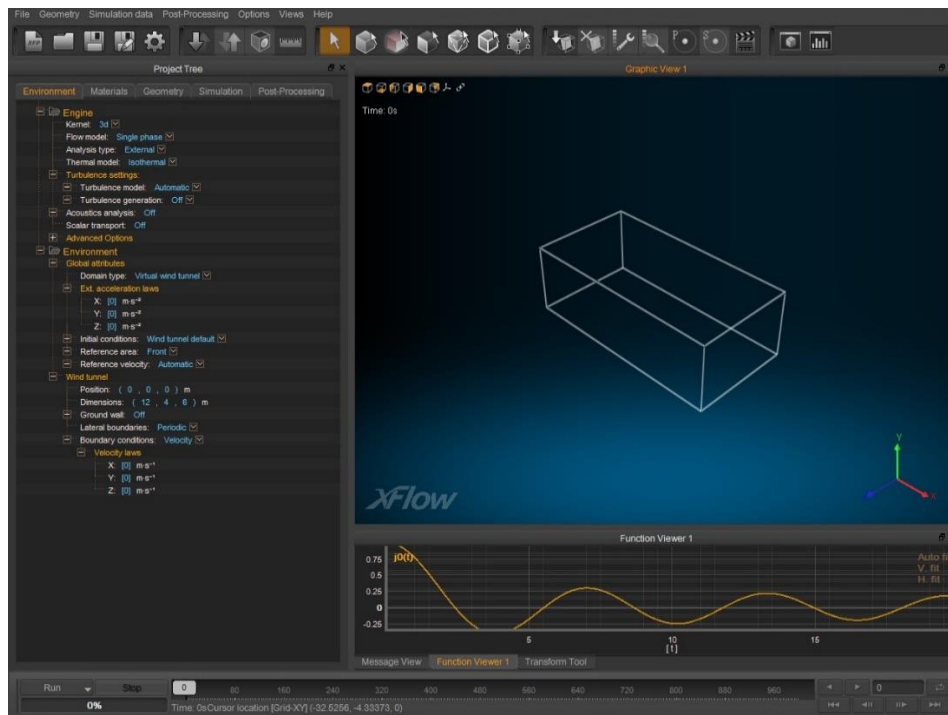


Figura 7.1 Interfaz gráfica

### 7.1.1. Main menu

Como en cualquier otro software, el “*Main menu*” (Menú principal) cuenta con una ventana “*File*” (Archivo) que sirve para cargar o guardar proyectos.

En la ventana “*Geometry*” (Geometría), tiene dos opciones de cargar un objeto: el programa puede crear objetos básicos (esferas, cilindros, cubos, perfil NACA...) o importar geometrías. Ofrece otras opciones más avanzadas, como “*Showhide holes*” (Mostrar agujeros ocultos), que sirve para detectar agujeros existentes en una superficie cerrada, o “*Healing*” (Curación), herramienta que arregla los agujeros de la superficie.

Las ventanas “*Simulation data*” (Datos de simulación) y “*Post-processing*” (Post-proceso) sirven para importar datos de simulaciones anteriores y resultados obtenidos. Además, en “*Post-processing*” hay varias opciones como crear planos de corte o sensores que permiten estudiar la simulación gráficamente.

Por último en “*Options*” (Opciones), se pueden cambiar aspectos generales del programa como seleccionar el número de CPUs que trabajarán o aspectos gráficos de la interfaz. Las diferentes ventanas que aparecen en el menu principal de XFlow™ se muestran en la Figura 7.2.



**Figura 7.2** Ventanas del menu principal

### 7.1.2. [Toolbar](#)

La barra de herramientas (Figura 7.3) ofrece atajos para las opciones más utilizadas de XFlow™, consiste en una serie de iconos que permiten trabajar más rápidamente. El programa permite al usuario mostrar o esconder diferentes listas de herramientas.



**Figura 7.3** Barra de herramientas

### 7.1.3. [Project tree](#)

Es la estructura principal del programa, sirve para configurar los diferentes parámetros de la simulación. Se divide en cinco bloques que siguen la secuencia lógica requerida para desarrollar el análisis aerodinámico, la ventana del “*Project tree*” se muestra en la Figura 7.4.

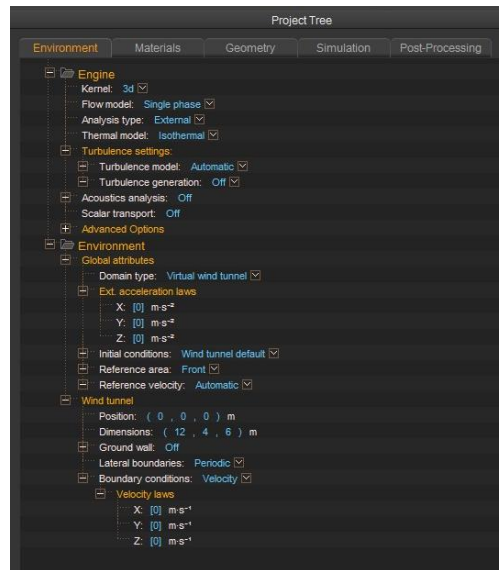


Figura 7.4 Project tree

Categorías del Project tree:

- Environment: Esta categoría contiene dos carpetas, “Engine” y “Environment”. En la primera se selecciona el motor de XFlow™, aspectos como el modelo de flujo, tipo de análisis o el modelo de turbulencia que se estudiarán en detalle más adelante. En la segunda carpeta, se definen las condiciones de contorno y las fuerzas externas.
- Materials: Se definen las propiedades termo-físicas del fluido.
- Geometry: Se muestran los objetos ejecutados por el programa, permite especificar el comportamiento de los objetos así como sus condiciones de contorno.
- Simulation: Esta categoría engloba la configuración de todos los parámetros necesarios para llevar a cabo la simulación.

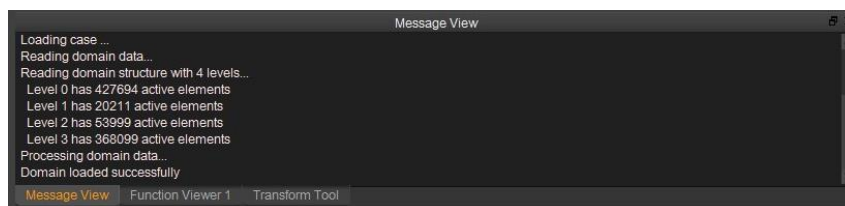
- Post-processing: Una vez que la simulación se está ejecutando o está calculada completamente, la visualización y opciones de post-proceso se muestran en este apartado.

Estas cinco categorías se estudiarán en profundidad en el siguiente apartado, llevando a cabo diferentes configuraciones para encontrar la más adecuada, que permita realizar un estudio aerodinámico completo.

#### 7.1.4. [Message view](#)

Ventana (Figura 7.5) que muestra los diferentes mensajes en relación a:

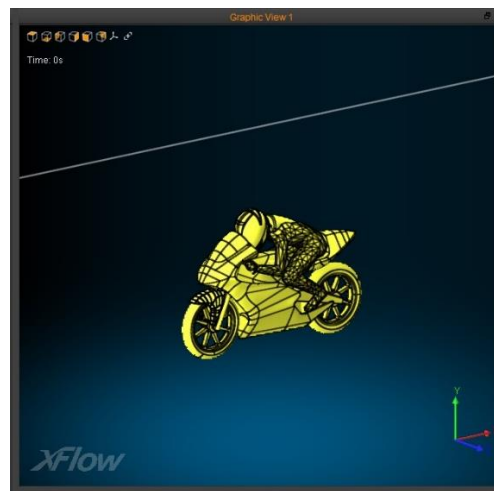
- Progreso de la simulación
- Errores
- Advertencias



**Figura 7.5** Ventana Message view

#### 7.1.5. [Graphic view](#)

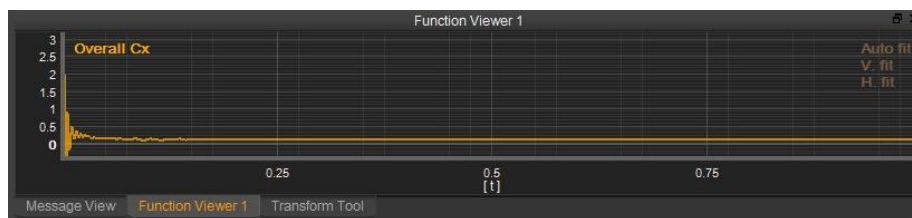
Expone los resultados de la simulación de manera gráfica. Se pueden crear varias ventanas gráficas que permiten contemplar diferentes zonas sometidas a estudio. En la Figura 7.6 se observa la moto en la ventana gráfica una vez que se ha cargado en el programa XFlow™.



**Figura 7.6** *Graphic view*

#### 7.1.6. [Function viewer](#)

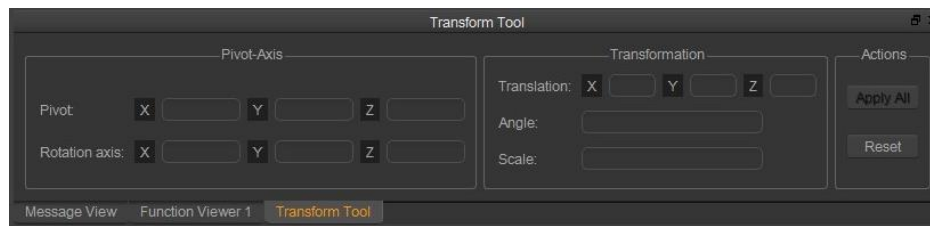
Es una ventana interactiva donde el usuario puede visualizar una función, así como analizar y exportar los resultados de la simulación, tal y como se observa en la Figura 7.7.



**Figura 7.7** *Ventana Function Viewer*

#### 7.1.7. [Transform tool](#)

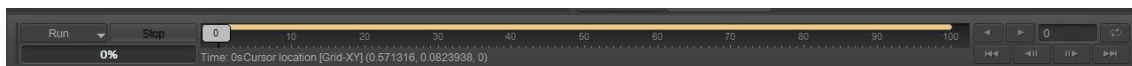
Esta herramienta se puede usar para mover, rotar y modificar la escala de un objeto, en la Figura 7.8 se muestran los diferentes parámetros que se puede configurar con esta herramienta.



**Figura 7.8** Ventana Transform tool

### 7.1.8. Time controls

Se monitoriza el tiempo de la simulación y mediante un panel de mando permite controlar el tiempo, rebobinar o pausar la simulación, como se muestra en la Figura 7.9.



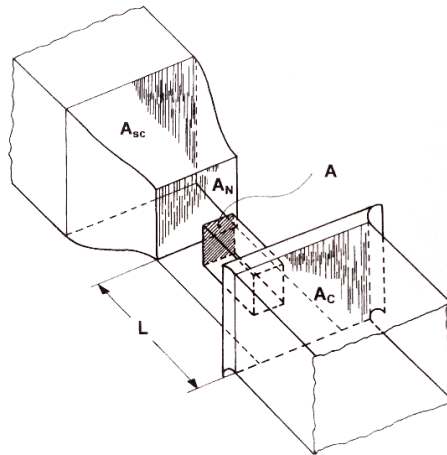
**Figura 7.9** Ventana Time controls

## 7.2. Configuración del túnel de viento

La simulación en los túneles de viento y en los programas de CFD (Computational Fluid Dynamics) realiza aproximaciones de las condiciones de la carretera, pero no las reproducen exactamente. Como es típico de las simulaciones, se producen desviaciones de la realidad. Para el desarrollo de este apartado se empleó la información aportada por Wolf-Heinrich Hucho en su libro [4].

Estos ensayos, comienzan en los programas de CFD, los cuales permiten obtener unos resultados con alto grado de fiabilidad que posteriormente, si son positivos, se estudiarían en túneles de viento, usando normalmente modelos a escala de los prototipos. Este proceso permite un gran ahorro de costes de fabricación de prototipos, ya que antes de construirlos, se prueban con los dos métodos comentados anteriormente.

En este proyecto, se cuenta con un archivo de CAD de la moto que está a escala 1:1 con la moto real, por tanto, para calcular las medidas necesarias que debe tener el túnel de viento, se debe asemejar a un túnel de viento real. Los diferentes parámetros geométricos que configuran un túnel de viento se muestran en la Figura 7.10.



**Figura 7.10** Configuración de un túnel de viento [4]

Para definir tanto el área transversal como la longitud del túnel de viento, existen dos parámetros para calcularlas, en función del tamaño del objeto que se quiera estudiar.

En primer lugar, para calcular el área transversal del túnel de viento, se utiliza el parámetro  $\varphi$ , llamado ratio de bloqueo (blockage ratio), cuya expresión se muestra en la Ecuación 7.1:

$$\varphi = \frac{A}{A_N}$$

**Ecuación 7.1**

$A_N$ : Área transversal del túnel de viento

$A$ : Área frontal del vehículo

Generalmente, el valor empleado de este parámetro es  $\varphi=0,1$ , el área frontal de la moto original es de  $0,405 \text{ m}^2$ , por tanto se puede calcular el área



transversal mínima ( $A_N$ ) que debe tener el túnel de viento. Aunque posteriormente el área frontal cambie debido a las diferentes posiciones en las que se encontrarán el piloto y la moto, se mantendrá el mismo valor de área transversal mínima. En la Ecuación 7.2 se muestra la expresión para el cálculo del área transversal mínima:

$$A_N = \frac{A}{\varphi} = \frac{0,405 \text{ m}^2}{0,1} = 4,05 \text{ m}^2$$

**Ecuación 7.2**

En este proyecto se empleará un área transversal considerablemente mayor, que permitirá obtener unos resultados fiables, haciendo que las paredes del túnel no intervengan en la simulación, además de eliminar el problema de las diferentes áreas frontales con las que se trabajará en este proyecto. El área seleccionada será de 24 m<sup>2</sup>.

Hay que añadir que la forma típica que suele emplearse de túnel de viento, es rectangular y con un ratio entre la altura y la anchura de 0,66. Los valores de altura y anchura necesarios para obtener este ratio son 4 m y 6 m respectivamente.

En lo referente a la longitud del túnel de viento se emplea el parámetro  $\lambda$ , denominado longitud relativa (relative length) (Ecuación 7.3):

$$\lambda = \frac{L}{D_N}$$

**Ecuación 7.3**

$L$ : Longitud del túnel de viento

$D_N$ : Diámetro equivalente de la tobera,  $D_N = 4 A_N / C$ , donde  $C$  es el perímetro mojado

Se calcula en primer lugar el diámetro equivalente ( $D_N$ ) (Ecuación 7.4):

$$D_N = \frac{4 \times (4 \times 6)}{2 \times 4 + 2 \times 6} = 4,8 \text{ m}$$

**Ecuación 7.4**

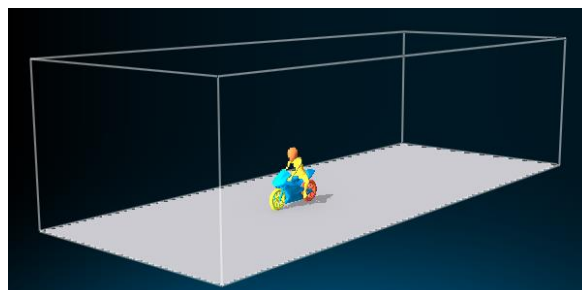
El parámetro longitud relativa ( $\lambda$ ), debe ser suficientemente grande como para que exista un gradiente de presión nulo a lo largo de todo el túnel, para conseguir esto, se emplean valores de  $\lambda=3$ . Aunque este valor es óptimo, la tobera de entrada genera una influencia mínima, pero que debe ser tenida en cuenta. En este proyecto, la influencia de la tobera de entrada se va a omitir. En la Ecuación 7.5 se observa el cálculo del parámetro longitud relativa.

$$L = \lambda \times D_N = 3 \times 4,8 = 14,4 \text{ m}$$

**Ecuación 7.5**

Se va a simular el túnel de viento con una longitud de 15 m. Por tanto, las dimensiones del túnel serán 15 x 4 x 6 m. Estos valores se introducirán en el programa XFlow™, a su vez, se activará la opción “Ground wall” (Suelo del túnel), que realiza las simulaciones con un túnel de viento al que se le añade el suelo.

Por tanto las dimensiones del túnel calculadas evitarán que las paredes del mismo intervengan a la hora de realizar las simulaciones, como se observa en la Figura 7.11, el túnel es suficientemente amplio para albergar la moto y contar con un gran espacio libre hasta las paredes.



**Figura 7.11** Moto dentro del túnel de viento

## **8. GENERACIÓN DE UN MODELO BASE**



## 8. GENERACIÓN DE UN MODELO BASE

Se trata de conseguir el modelo adecuado para poder llevar a cabo las mejoras aerodinámicas en los apartados posteriores, para ello, en primer lugar se van a realizar varios ensayos sobre el archivo de la moto original y en la moto modificada, en la que los diferentes elementos que componen el conjunto de la moto van separados. En estas pruebas se buscará la convergencia entre el coeficiente de arrastre y el número de elementos, que permitirá obtener el número de elementos adecuado sin que se pierda mucha precisión de cálculo. Cabe señalar que todos los estudios se realizarán con el piloto en posición de mínima resistencia, es decir, cuando la moto circula por una recta.

Puesto que la moto no es un elemento que genere excesiva sustentación positiva ni negativa, el coeficiente de sustentación no se empleará en los estudios de convergencia, pero si se añadirán los resultados que se obtengan en cada uno de los ensayos para comprobar que el valor del coeficiente de sustentación es cercano a cero y que por tanto no se genera sustentación.

### 8.1. Estudio de convergencia de la moto original

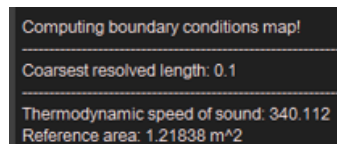
En este apartado se van a realizar varios ensayos del modelo, donde se cambiarán diferentes parámetros del estudio en el túnel de viento, como el tamaño de malla, modelo de turbulencia o tiempo de la simulación. El objetivo consiste en poner a punto cada variable que intervenga en el modelo, y buscar un modelo base donde se desarrollarán los estudios posteriores.

A continuación se detallarán las características y parámetros con los que se realizarán las pruebas, así como los resultados obtenidos en cada una de ellas. Por último se realizará una valoración para definir cuál será el modelo base sobre el que se trabajará.

Cabe destacar que estos primeros ensayos se realizarán con la moto ubicada en el suelo del túnel de viento, y en la parte central del mismo, cuyas

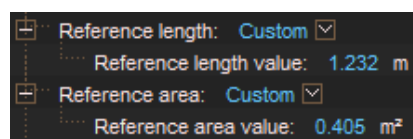
medidas son 15 x 4 x 6 m. Se realizarán los ensayos con la moto a una velocidad de 38,8 m/s (140 km/h).

El programa puede calcular de manera automática el área y longitud de referencia que se utilizan para la simulación, pero surgieron problemas debido a que los valores no correspondían con los reales. Estos problemas se deben a que la moto se introduce en el programa con una orientación que no es adecuada, y al orientarla para realizar el ensayo, sigue tomando los valores iniciales de área y longitud de referencia, como se observa en la Figura 8.1.



**Figura 8.1** Error en el área de referencia

Por tanto, se realizó una medición en Solidworks™ del área de referencia (área frontal de la moto) y longitud de referencia (distancia entre ejes de la moto), obteniéndose unos valores de 0,405 m² y 1,232 m respectivamente. Estos valores se introducen en los apartados de “*Reference area value*” (Valor área de referencia) y “*Reference length value*” (Valor longitud de referencia). Existe la posibilidad de cambiar los ejes de coordenadas de la moto dentro del programa XFlow™, para que coincidan con los ejes del túnel de viento, pero esta segundo método se desestimó porque generaba errores de medición en el modelo del siguiente apartado, en el cual se importan los archivos al programa por separado, se explicará más en profundidad en su apartado correspondiente. Por tanto, la solución consistirá en introducir los valores determinados de área y longitud de referencia en los apartados de “*Reference area value*” y “*Reference length value*” (Figura 8.2).



**Figura 8.2** Área y longitud de referencia personalizadas

En cuanto a los algoritmos de refinamiento de la malla, se va a emplear el método “*Adaptative Refinement*” (Refinamiento adaptativo), que genera una malla cuyo refinamiento se va adaptando dinámicamente al movimiento de la geometría siguiendo su movimiento. El tamaño de la malla se cambiará en cada ensayo, para después elegir el mallado más fino posible y que permita obtener un tiempo de cálculo relativamente bajo, así como unos buenos resultados.

Para obtener el feedback del experimento, existe un parámetro de estabilidad (Courant). Este valor debe encontrarse entre los valores 0 y 1, si el valor es cercano a cero, hay que aumentar el “Time step” (Incremento del tiempo de cálculo).

Como se expuso anteriormente, en el apartado “Aerodinámica de la moto”, se cuenta con una tabla en la que se muestran valores del coeficiente de arrastre por el área frontal de varios modelos de moto. Para este proyecto, el valor representativo corresponde con el modelo Honda™ RS125 de 1996 con el piloto en posición de mínima resistencia, el cual es de 0,2 m<sup>2</sup>. Se utilizará como base para la generación del modelo con el que se realizarán las posteriores simulaciones.

Las características comunes de todos los ensayos son las siguientes:

- *Modelo de turbulencia:* Automático
- *Generación de turbulencia:* Automático
- *Longitud de referencia:* 1,232 m
- *Área de referencia:* 0,405 m<sup>2</sup>
- *Dimensiones túnel de viento:* 15 x 4 x 6 m
- *Velocidad de la moto:* 38,8 m/s
- *Densidad de referencia:* 1,225 kg/m<sup>3</sup>
- *Temperatura de operación:* 288,15 K
- *Viscosidad dinámica:* 1,7894x10<sup>-5</sup> Pas
- *Tiempo de simulación:* 1 s
- *Courant:* 1

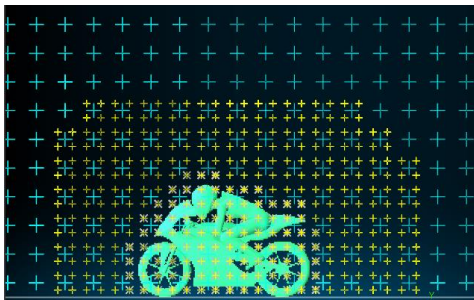
- *Algoritmo de refinamiento: Adaptive Refinement*
- *Distancia de control de la turbulencia: 5 m*

#### 8.1.1. Ensayo 1. Moto original. (RS: 0,3 - TRS: 0,15)

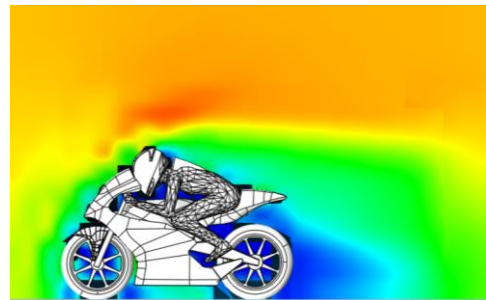
Características del ensayo:

- Resolved Scale: 0,3 m
- Target Resolved Scale: 0,15 m
- Wake Resolution: 0,15 m

El tiempo de cálculo necesario para completar la simulación fue de 5 minutos, realizado con un mallado de 19.140 elementos. Como se observa en la siguiente imagen, el mallado no se amolda a la forma de la moto, en los posteriores ensayos con mallados más finos, se podrá ver como el mallado se amolda cada vez mejor a la forma de la moto. Además, en la imagen que muestra el resultado de la simulación, se aprecia que el mallado ha generado huecos debido a que los elementos de la malla son demasiado grandes (Figura 8.3).



a) Mallado Ensayo 1



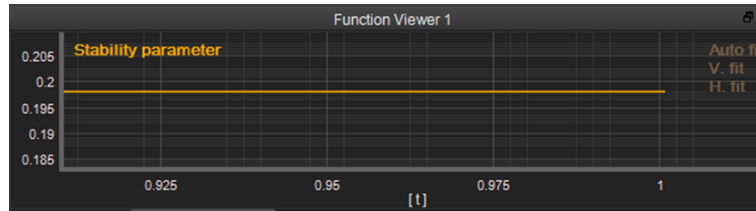
b) Turbulencia Ensayo 1. Moto original

**Figura 8.3** Resultados Ensayo 1. Moto original

Según la ecuación que usa el programa para el cálculo de las transiciones del tamaño de la malla, en este caso, hay un único cambio del tamaño de malla, parte de 0,3 m (Resolved scale) hasta 0,15 m (Target resolved scale). La ecuación parte del valor que se le asigna al “Resolved scale” y según ese valor permite obtener diferentes tamaños de mallas seleccionando un número



determinado de transiciones. Los resultados referentes al parámetro de estabilidad se observan en la Figura 8.4.

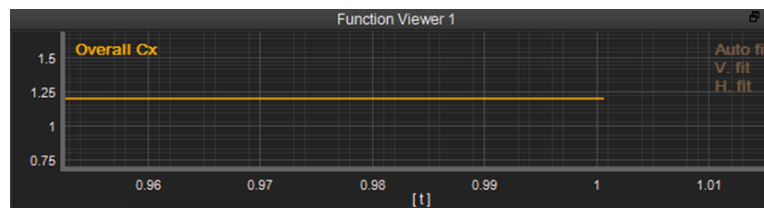


**Figura 8.4** *Parámetro de estabilidad Ensayo 1. Moto original*

Ofrece un feedback adecuado, ya que el valor del parámetro de estabilidad durante toda la simulación se encuentra entre los valores 0 y 1.

#### **Resultados del ensayo:**

- **Coefficiente de arrastre (Cx):**



**Figura 8.5** *Coefficiente de arrastre Ensayo 1. Moto original*

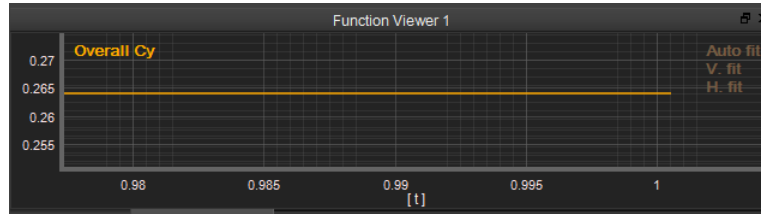
Se exportaron los datos obtenidos en la simulación a un archivo Excel. Para la realización del promedio se cogieron los datos obtenidos entre los tiempos 0,7 a 1 segundo. Esta operación se utilizará por igual en todos los ensayos. El coeficiente de arrastre promedio obtenido en este primer ensayo fue de 1,204, con una desviación típica de  $\pm 0,001$ . En la Figura 8.5 se muestran los resultados del coeficiente de arrastre.

$$C_x \times A = 1,204 \times 0,405 = 0,486 \text{ m}^2$$

**Ecuación 8.1**

El valor obtenido en la Ecuación 8.1 no es representativo y no se asemeja al valor de 0,2 m<sup>2</sup>. Esto es debido a que el mallado es demasiado grueso y no simula de manera adecuada el volumen ni las formas que posee la moto.

- Coeficiente de sustentación ( $C_y$ ):



**Figura 8.6** Coeficiente de sustentación Ensayo 1. Moto original

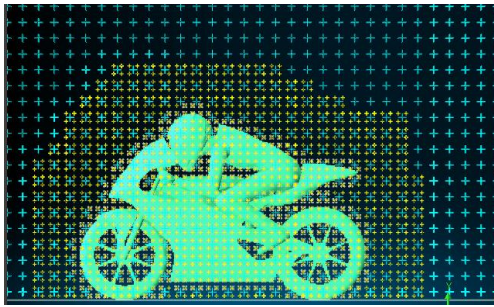
En la Figura 8.6 se observa que el coeficiente de sustentación es estable, la moto genera sustentación positiva, concretamente, el valor promedio de  $C_y$  es 0,264. Como se ha explicado en el caso del  $C_x$ , este ensayo no es representativo debido al excesivo grosor de la malla.

#### 8.1.2. Ensayo 2. Moto original. (RS: 0,1 - TRS: 0,05)

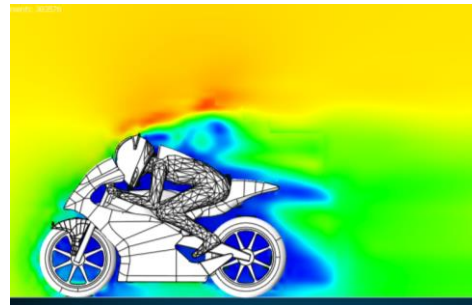
Características del ensayo:

- Resolved Scale: 0,1 m
- Target Resolved Scale: 0,05 m
- Wake Resolution: 0,05 m

El tiempo de cálculo necesario para completar la simulación fue de 1 hora, realizado con un mallado de 383.627 elementos. El tamaño de los elementos de la malla, así como la turbulencia que genera la moto se muestran en la Figura 8.7.



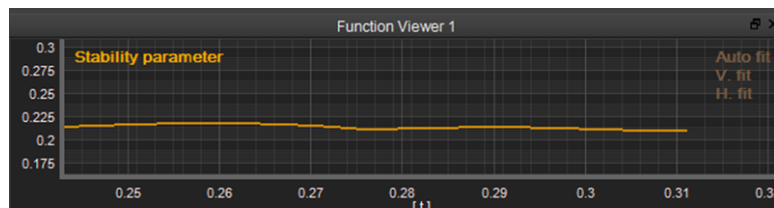
a) Mallado Ensayo 2. Moto original



b) Turbulencia Ensayo 2. Moto original

**Figura 8.7** Resultados Ensayo 2. Moto original

En este segundo ensayo ocurre lo mismo que en el primero, hay un único cambio del tamaño de malla, parte de 0,1 m y cambia a 0,05 en las regiones cercanas a las superficies de la moto, así como en la estela que genera la misma.

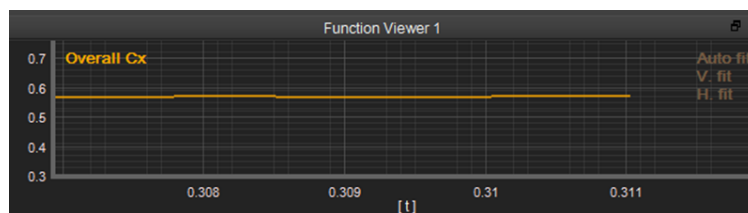


**Figura 8.8** Parámetro estabilidad Ensayo 2. Moto original

Ofrece un feedback adecuado, ya que el valor del parámetro de estabilidad durante toda la simulación se encuentra entre los valores 0 y 1, se observa claramente en la Figura 8.8.

### **Resultados del ensayo:**

- **Coeficiente de arrastre ( $C_x$ ):**



**Figura 8.9** Coeficiente de arrastre Ensayo 2. Moto original

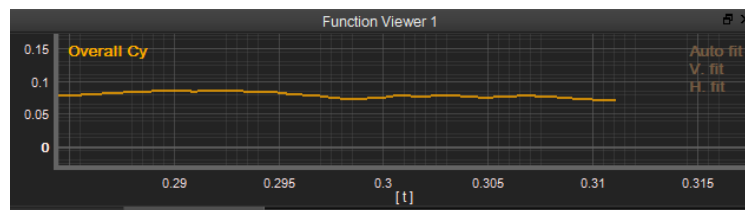
Se observa en la Figura 8.9 que una vez se produce la estabilización del  $C_x$ , el valor calculado para esta prueba es 0,571, con una desviación típica de  $\pm 0,004$ .

$$C_x \times A = 0,571 \times 0,405 = 0,231 \text{ m}^2$$

#### Ecuación 8.2

El valor obtenido en la Ecuación 8.2 sin reflejar un modelo adecuado, como se ve en la imagen del mallado, es demasiado grueso y distorsiona las formas de la moto, se asemeja más al valor de  $0,2 \text{ m}^2$ , pero sigue sin ser correcto. Es necesario realizar ensayos con mallados más finos para comprobar que el valor de  $C_x$  multiplicado por el área se iguala al valor tomado como base del estudio.

- Coeficiente de sustentación ( $C_y$ ):



**Figura 8.10** Coeficiente de sustentación Ensayo 2. Moto original

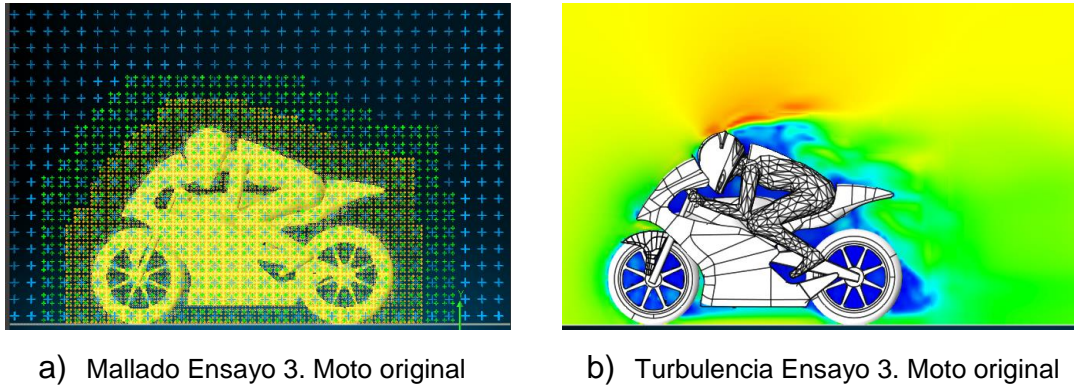
Se observa un descenso de la sustentación positiva hasta un valor de 0,085, aunque sigue sin ser representativo, ya que la moto no es un elemento sustentador, sino que como se verá en posteriores ensayos con malla más fina y que se adapte mejor a la geometría de la moto, el  $C_y$  irá variando entre valores de sustentación positiva y negativa. En la Figura 8.10 se puede ver la evolución del valor del coeficiente de sustentación.

#### 8.1.3. Ensayo 3. Moto original. (RS: 0,1 - TRS: 0,025)

Características del ensayo:

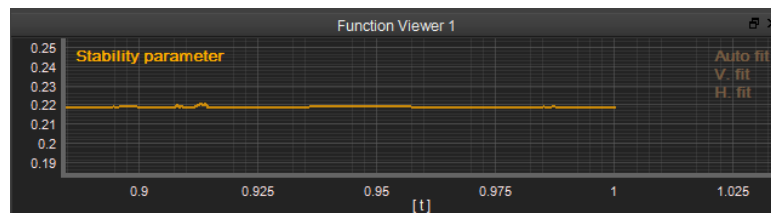
- Resolved Scale: 0,1 m
- Target Resolved Scale: 0,025 m
- Wake Resolution: 0,025 m

El tiempo de cálculo necesario para completar la simulación fue de 2 horas, realizado con un mallado de 464.222 elementos. La Figura 8.11 muestra la malla generada y la turbulencia que se genera.



**Figura 8.11** Resultados Ensayo 3. Moto original

En esta prueba, se producen dos cambios en el tamaño de malla, por tanto se obtienen tres mallados diferentes, partiendo de 0,1 m hasta llegar al mallado más pequeño de 0,025 m. En la Figura 8.12 se observa la estabilización que se produce en el valor de estabilidad.



**Figura 8.12** Parámetro de estabilidad Ensayo 3. Moto original

Ofrece un feedback adecuado, ya que el valor del parámetro de estabilidad durante toda la simulación se encuentra entre los valores 0 y 1.

### **Resultados del ensayo:**

- **Coefficiente de arrastre (Cx):**



**Figura 8.13** Coeficiente de arrastre Ensayo 3. Moto original

En la Figura 8.13 se produce una del Cx, el valor promedio de este parámetro adimensional es 0,488, con una desviación típica de  $\pm 0,005$ .

$$C_x \times A = 0,488 \times 0,405 = 0,197 \text{ m}^2$$

#### **Ecuación 8.3**

El valor obtenido en la Ecuación 8.3 se asemeja al valor de  $0,2 \text{ m}^2$  y se puede confirmar como válido. Una vez confirmado como válido este ensayo, se van a realizar otros ensayos con mallados más finos hasta establecer un número de elementos máximo que el ordenador sea capaz de calcular en un tiempo relativamente pequeño y que ofrezca buenos resultados.

- **Coefficiente de sustentación (Cy)**



**Figura 8.14** Coeficiente de sustentación Ensayo 3. Moto original

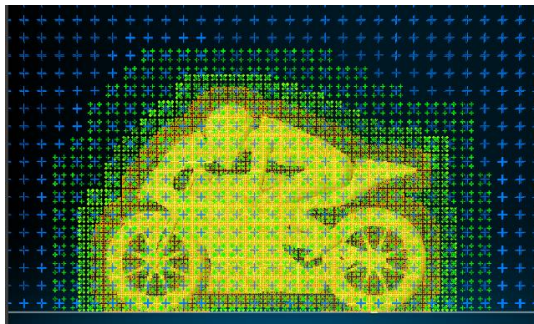
Similar resultado que en el ensayo anterior, aunque se observa una reducción del coeficiente de sustentación (Figura 8.14), que ahora es de 0,071.

#### 8.1.4. Ensayo 4. Moto original. (RS: 0,1 - TRS: 0,0125)

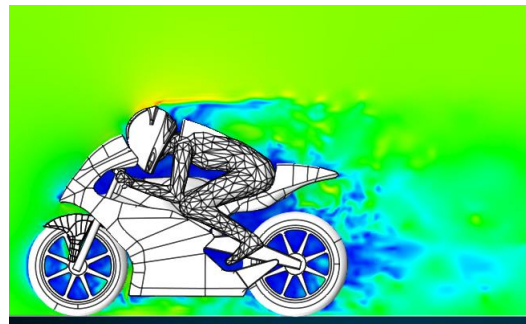
Características del ensayo:

- Resolved Scale: 0,1 m
- Target Resolved Scale: 0,0125 m
- Wake Resolution: 0,0125 m

El tiempo de cálculo necesario para completar la simulación fue de 7,5 horas, realizado con un mallado de 893.273 elementos. En la Figura 8.15 se observa el mallado que realizó el programa, así como la turbulencia que se generó en la simulación en un determinado intervalo de tiempo



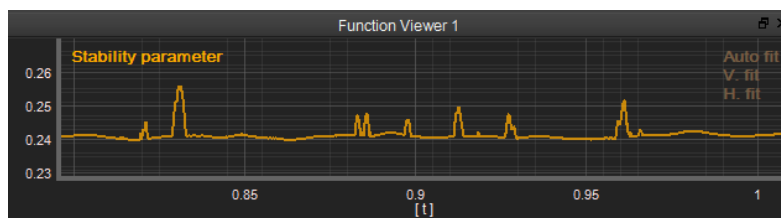
a) Mallado Ensayo 4. Moto original



b) Turbulencia Ensayo 4. Moto original

**Figura 8.15** Resultados Ensayo 4. Moto original

El mayor número de transiciones posibles en el tamaño de malla es 3, es lo que ocurre en este caso, generando 4 mallas diferentes.



**Figura 8.16** Parámetro de estabilidad Ensayo 4. Moto original

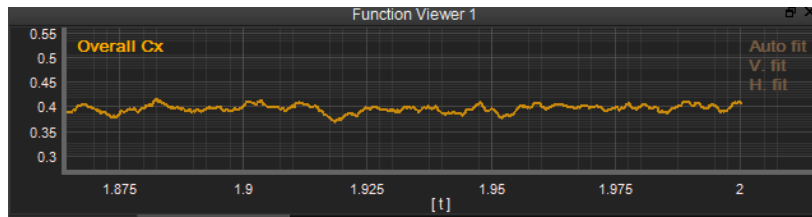
Ofrece un feedback adecuado, ya que el valor del parámetro de estabilidad durante toda la simulación se encuentra entre los valores 0 y 1.



Aunque en la Figura 8.16 se observan unos picos, se puede asegurar que el cálculo es correcto, ya que éstos no sobrepasan el valor de 0,4.

### **Resultados del ensayo:**

- **Coeficiente de arrastre (Cx)**



**Figura 8.17** Coeficiente de arrastre Ensayo 4. Moto original

Este ensayo muestra mayores variaciones en los resultados, tal y como se puede ver en la Figura 8.17, pero estas variaciones no se tienen en cuenta y una vez realizado el promedio, se obtiene un valor de 0,396, con una desviación típica de  $\pm 0,007$ .

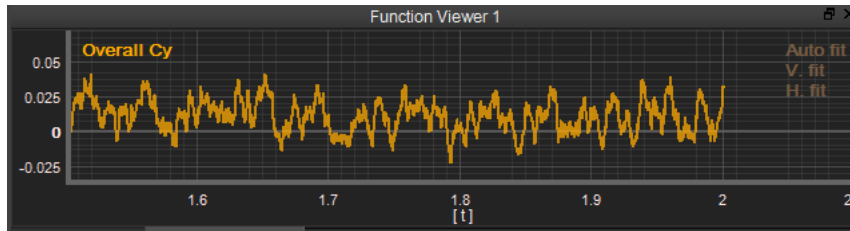
$$C_x \times A = 0,396 \times 0,405 = 0,16 \text{ m}^2$$

#### **Ecuación 8.4**

El valor obtenido en la Ecuación 8.4 se asemeja al valor de  $0,2 \text{ m}^2$ , pero es relativamente inferior, esto podría ser debido a la ausencia de conductos de refrigeración dentro de la moto, obteniéndose como consecuencia un menor coeficiente de arrastre, por tanto se puede confirmar como válido. Una vez confirmado como válido este ensayo, se van a realizar otros ensayos con mallados más finos hasta establecer un número de elementos máximo que el ordenador sea capaz de calcular en un tiempo relativamente pequeño y que ofrezca buenos resultados.



- Coeficiente de sustentación ( $C_y$ )



**Figura 8.18** Coeficiente de sustentación Ensayo 4. Moto original

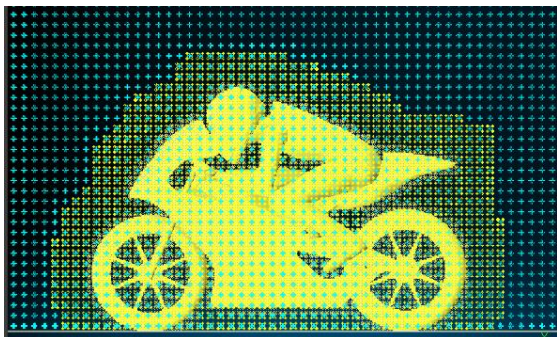
A partir de este ensayo se empiezan a vislumbrar resultados (Figura 8.18) más acordes con lo esperado, repetidas fluctuaciones entre valores positivos y negativos de  $C_y$ . En este caso, el valor promedio calculado es 0,016.

#### 8.1.5. Ensayo 5. Moto original. (RS: 0,05 - TRS: 0,025)

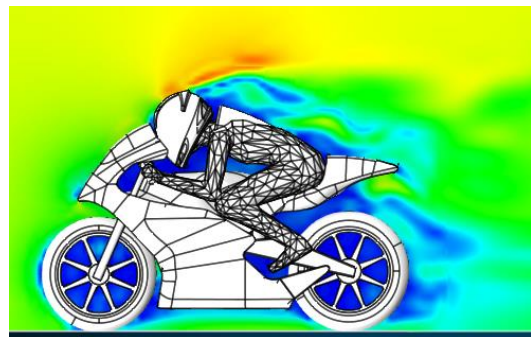
Características del ensayo:

- Resolved Scale: 0,05 m
- Target Resolved Scale: 0,025 m
- Wake Resolution: 0,025 m

El tiempo de cálculo necesario para completar la simulación fue de 12 horas, realizado con un mallado de 2.957.537 elementos. Se puede ver que el mallado se adapta cada vez mejor a la forma de la moto (Figura 8.19).



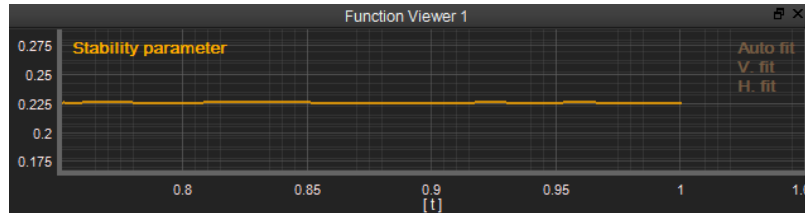
a) Mallado Ensayo 5. Moto original



b) Turbulencia Ensayo 5. Moto original

**Figura 8.19** Resultados Ensayo 5. Moto original

Se produce un único cambio del tamaño de malla, generado automáticamente por el programa.

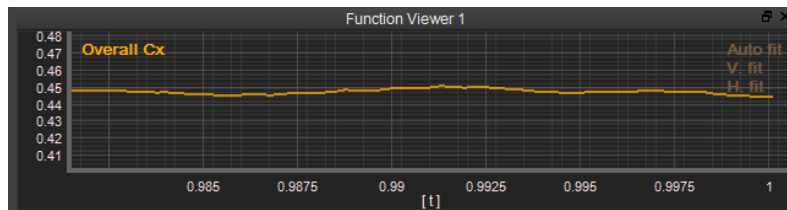


**Figura 8.20** *Parámetro de estabilidad Ensayo 5. Moto original*

Ofrece un feedback adecuado, ya que el valor del parámetro de estabilidad durante toda la simulación se encuentra entre los valores 0 y 1 (Figura 8.20).

### **Resultados del ensayo:**

- **Coeficiente de arrastre (Cx)**



**Figura 8.21** *Coeficiente de arrastre Ensayo 5. Moto original*

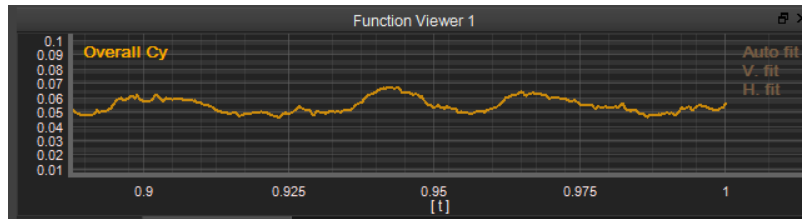
Se observa que una vez se produce la estabilización del Cx (Figura 8.21), obteniéndose un valor promedio de 0,446 con una desviación típica de  $\pm 0,002$ .

$$C_x \times A = 0,446 \times 0,405 = 0,189 \text{ m}^2$$

### **Ecuación 8.5**

El valor obtenido en la Ecuación 8.5 es menor que el valor de referencia de  $0,2 \text{ m}^2$ , aunque mayor al valor que calculado en el ensayo 4, respecto a la desviación típica, se obtiene un valor bajo, permitiendo afirmar que no hay mucha desviación entre los resultados del ensayo.

- Coeficiente de sustentación ( $C_y$ )



**Figura 8.22** Coeficiente de sustentación Ensayo 5. Moto original

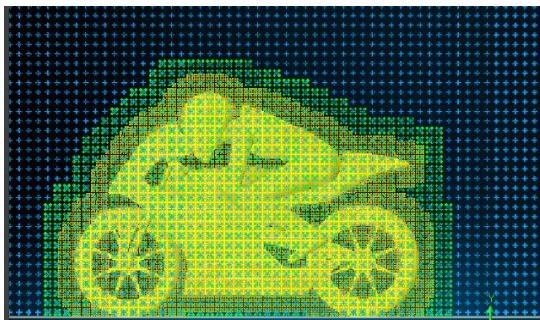
Como se observa en la Figura 8.22, los resultados no varían entre valores positivos y negativos, pero los datos obtenidos muestran un valor bajo de  $C_y$  ligeramente superior al valor promedio del ensayo 4, pero muy cercano a cero. Este valor promedio es 0,053.

8.1.6. Ensayo 6. Moto original. (RS: 0,05 - TRS: 0,0125)

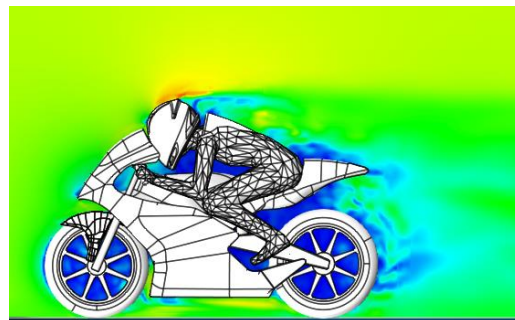
Características del ensayo:

- Resolved Scale: 0,05 m
- Target Resolved Scale: 0,0125 m
- Wake Resolution: 0,0125 m

El tiempo de cálculo necesario para completar la simulación fue de 1 día, realizado con un mallado de 3.270.475 elementos. En la Figura 8.23 se observa los diferentes tamaños de malla en los que se divide el túnel de viento, así como la turbulencia que se produce en la moto.



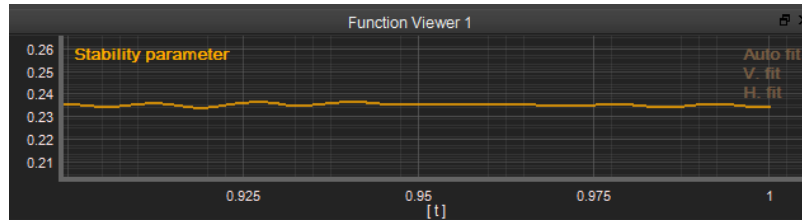
a) Mallado Ensayo 6. Moto original



b) Turbulencia Ensayo 6. Moto original

**Figura 8.23** Resultados Ensayo 6. Moto original

En este ensayo, hay dos cambios en el tamaño de malla, por lo que se generan 3 mallas diferentes, tal y como se observa en la Figura 8.23.

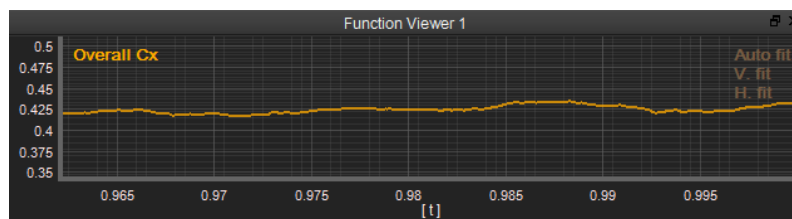


**Figura 8.24** *Parámetro de estabilidad Ensayo 6. Moto original*

Ofrece un feedback adecuado, tal y como muestra la Figura 8.24, ya que el valor del parámetro de estabilidad durante toda la simulación se encuentra entre los valores 0 y 1.

### **Resultados del ensayo:**

- **Coeficiente de arrastre (Cx):**



**Figura 8.25** *Coeficiente de arrastre Ensayo 6. Moto original*

En la Figura 8.25 se observa que una vez se produce la estabilización del Cx, calculando el promedio entre los tiempos 0,7 a 1 segundos, se obtiene un promedio de 0,425, junto con una desviación típica de  $\pm 0,004$ .

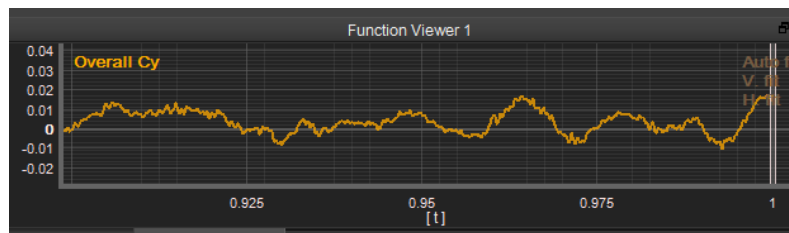
$$C_x \times A = 0,425 \times 0,405 = 0,1721 \text{ m}^2$$

### **Ecuación 8.6**

Ocurre como en el ensayo 5, conforme más fino es el mallado, mejor se adapta a la moto y el valor obtenido en la Ecuación 8.6 se asemeja más al valor de referencia, pero al no tener conductos de refrigeración, los cuales aumentan

el arrastre de la moto, se obtiene un valor menor. Por su parte tampoco hay un efecto de arrastre producido por las ruedas en movimiento, ya que en este estudio de convergencia no se les aplica giro.

- Coeficiente de sustentación ( $C_y$ ):



**Figura 8.26** Coeficiente de sustentación Ensayo 6. Moto original

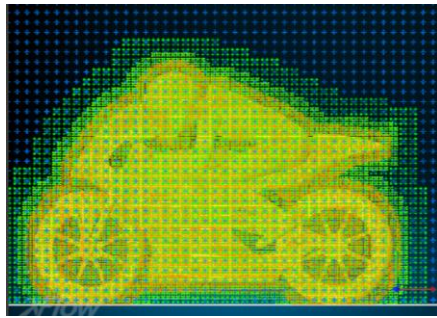
El valor promedio calculado en esta prueba es 0,004, un valor que confirma que la moto no es un elemento que genere una excesiva sustentación positiva. La Figura 8.26 muestra los resultados obtenidos del coeficiente de sustentación.

#### 8.1.7. Ensayo 7. Moto original. (RS: 0,05 - TRS: 0,00625)

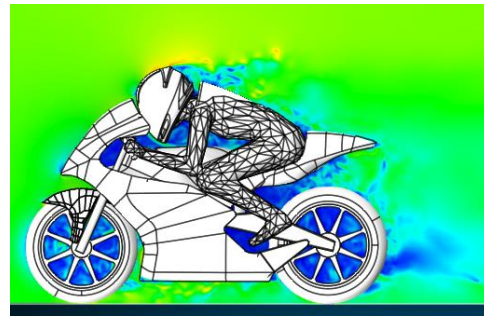
Características del ensayo:

- Resolved Scale: 0,05 m
- Target Resolved Scale: 0,00625 m
- Wake Resolution: 0,00625 m

El tiempo de cálculo necesario para completar la simulación fue de 3 días, realizado con un mallado de 4.621.407 elementos. La Figura 8.27 contiene el mallado realizado sobre la moto y la turbulencia generada por la motocicleta.



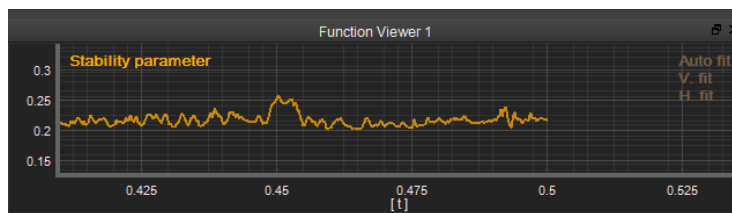
a) Mallado Ensayo 7. Moto original



b) Turbulencia Ensayo 7. Moto original

**Figura 8.27** Resultados Ensayo 7. Moto original

En esta última prueba efectuada con la moto original, se producen 3 transiciones en el tamaño de malla, generando 4 mallados diferentes.

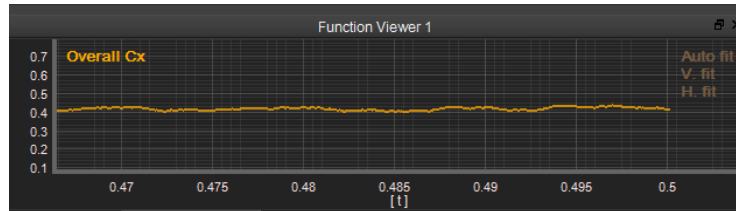


**Figura 8.28** Parámetro de estabilidad Ensayo 7. Moto original

Ofrece un feedback adecuado, ya que el valor del parámetro de estabilidad durante toda la simulación se encuentra entre los valores 0 y 1. Se observa que no hay un valor constante del parámetro de estabilidad, pero el valor de este parámetro se encuentra entre los valores de 0,2 y 0,4, por lo que la simulación es correcta. La Figura 8.28 muestra los datos obtenidos del parámetro de estabilidad durante un determinado intervalo de tiempo de la simulación.

### Resultados del ensayo:

- Coeficiente de arrastre (Cx):



**Figura 8.29** Coeficiente de arrastre Ensayo 7. Moto original

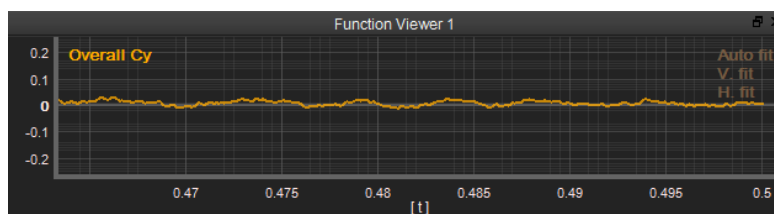
Realizando el cálculo del promedio de los valores obtenidos entre los intervalos de 0,7 a 1 segundos, se obtiene un valor promedio del coeficiente de arrastre de 0,415, con una desviación típica de  $\pm 0,009$ . En la Figura 8.29 se observa la estabilización que sufre el Cx.

$$C_x \times A = 0,415 \times 0,405 = 0,168 \text{ m}^2$$

#### **Ecuación 8.7**

De nuevo en la Ecuación 8.7 se obtiene un valor inferior al valor de referencia de 0,2 m<sup>2</sup>, se puede confirmar por tanto que el arrastre que genera esta motocicleta es menor que el arrastre obtenido en condiciones reales, principalmente debido tanto a la ausencia de conductos de refrigeración y ausencia de giro en las ruedas.

- Coeficiente de sustentación (Cy):



**Figura 8.30** Coeficiente de sustentación Ensayo 7. Moto original

El resultado promedio obtenido es 0,009, valor similar al ensayo anterior, tal y como se observa en la Figura 8.30 los valores arrojados son próximos a cero.



### 8.1.8. Convergencia de los resultados. Moto original

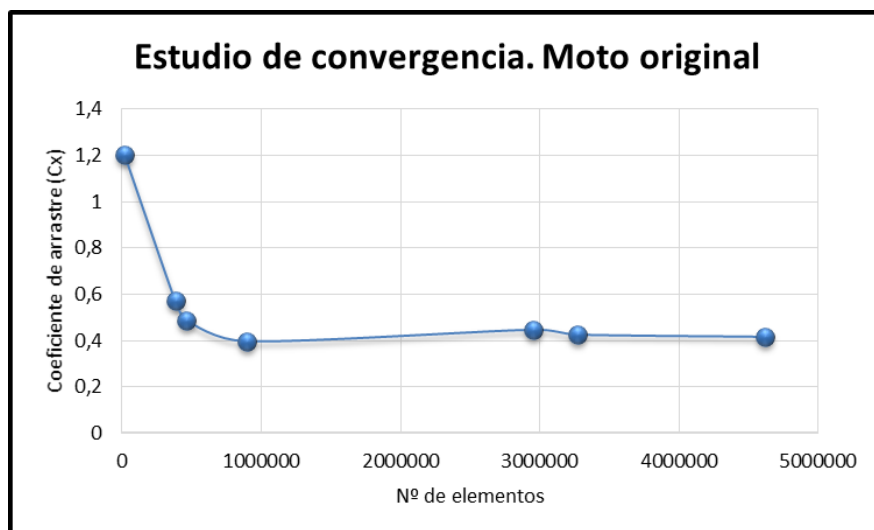
En la Figura 8.31 se muestran los resultados obtenidos para los diferentes ensayos:

Estudio de convergencia. Moto original							
Ensayos	Resolved scale (m)	Target resolved scale (m)	Wake resolution (m)	Nº elementos	Cx	Cy	t cálculo
Ensayo 1	0,3	0,15	0,15	19140	1,204	0,264	5 min
Ensayo 2	0,1	0,05	0,05	383627	0,571	0,085	1 h
Ensayo 3	0,1	0,025	0,025	464222	0,488	0,071	2 h
Ensayo 4	0,1	0,0125	0,0125	893273	0,396	0,016	7.5 h
Ensayo 5	0,05	0,025	0,025	2957537	0,446	0,053	12 h
Ensayo 6	0,05	0,0125	0,0125	3270475	0,425	0,004	24 h
Ensayo 7	0,05	0,00625	0,00625	4621407	0,415	0,009	72 h

**Figura 8.31** Resultados de los ensayos. Moto original

A continuación se presenta la gráfica de convergencia, se estudia el coeficiente de arrastre frente al número de elementos en los que se ha dividido la malla, como se observa, el valor hacia el que convergen los datos es algo superior a 0,4. Se supondrá un valor de Cx de 0,42.

Multiplicando el coeficiente de arrastre por el área de la moto, se obtiene un valor de 0,1701 m<sup>2</sup>, no corresponde exactamente al valor de referencia de 0,2 m<sup>2</sup>, pero como se explicó anteriormente, esto se debe a que no existen canales de refrigeración del motor y por tanto hay menor arrastre.



**Figura 8.32** Gráfica de convergencia. Moto original



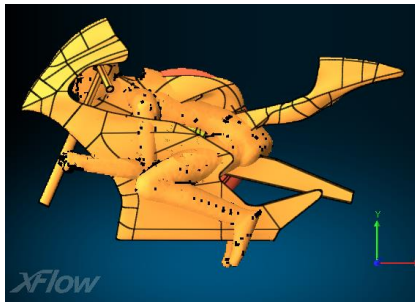
El estudio de convergencia (Figura 8.32) realizado con esta moto, servirá como base para los dos estudios posteriores, permitirá tener unos resultados sobre los que analizar los ensayos de la moto modificada en CAD y de la moto con movimiento rotacional en las ruedas. A partir de comparación, se seleccionarán unos parámetros del ensayo que obtenga mejores resultados para confeccionar un modelo base con el que se trabajará.

## 8.2. Estudio de convergencia de la moto modificada en CAD

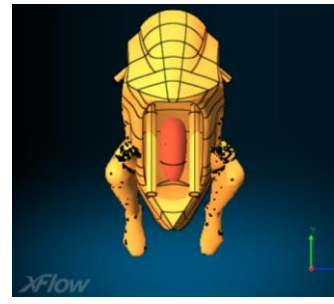
Este segundo estudio se introducirán las diferentes partes de la moto, la explicación de cómo se hizo la división de cada una de las piezas se expuso anteriormente. Se realizó la separación de las ruedas, piloto, casco y el piloto. Esto permitirá girar las ruedas de la moto, así como colocar al piloto en diferentes posturas en posteriores ensayos.

Los ensayos son similares a los realizados en el punto anterior, la diferencia reside en que en el estudio anterior, todos los elementos de la moto se introducen como un único sólido, mientras que en este estudio, se introducen por separado cada uno de ellos.

En cuanto a los problemas que surgieron en la medición del área de referencia (área frontal de la moto), el programa no conseguía calcular correctamente el área frontal de la moto, esto era debido a que los elementos se importaban en XFlow™ de manera que se sobreponían y ocupaban una menor superficie, como se observa en la Figura 8.33.



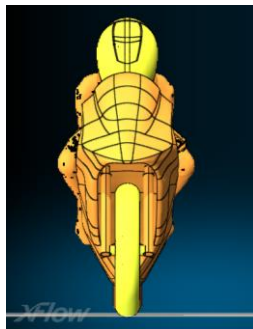
a) Vista lateral de la superposición



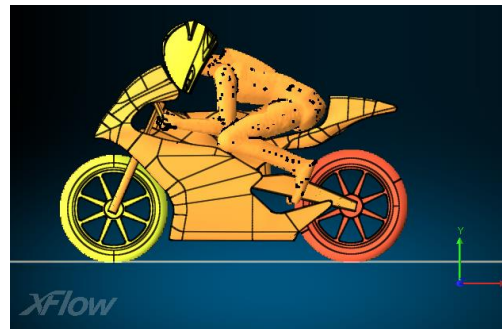
b) Vista frontal de la superposición

**Figura 8.33** Error de superposición en XFlow™, repercusión en la medición del área frontal

Cuando se colocaba cada elemento correctamente en la posición que le correspondía, se modificaba también el centro de gravedad de cada uno, pero el error seguía persistiendo, ya que el programa continuaba mostrando el mismo valor de área frontal. La Figura 8.34 muestra los diferentes elementos de la moto ubicados en su posición de estudio.



a) Vista frontal



b) Vista lateral

**Figura 8.34** Elementos de la moto colocados correctamente

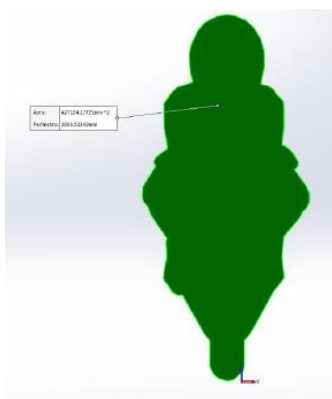
Debido a que el archivo que contiene al piloto está guardado con la extensión “.stl”, se realizó la proyección del área frontal en Catia™, para después trasladarla a Solidworks™ como archivo “.igs” y llevar a cabo la medición, obteniéndose un valor de 0,427 m<sup>2</sup>, algo mayor al que se obtuvo con la moto original, a causa de que el piloto ocupa un mayor volumen, ya que es diferente al piloto de la moto original. Aunque no influirá de manera significativa en el resultado de los ensayos. El proceso de medición del área frontal se muestra de manera simplificada en la Figura 8.35.



a) Moto vista frontal



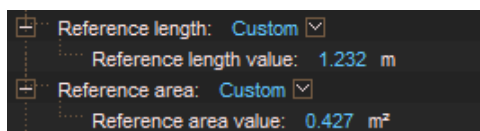
b) Generación de la silueta del área frontal



### c) Medición del área frontal

**Figura 8.35** *Medición del área frontal de la moto*

Para la introducción de los valores de área y longitud de referencia, se empleó el mismo método que en el apartado anterior, introduciendo dichos valores en “*Reference area value*” y “*Reference length value*” respectivamente (Figura 8.36).



**Figura 8.36** Valores de área y longitud de referencia

Las características generales de estos ensayos son similares a las del estudio de convergencia de la moto original, únicamente cambiará el área de referencia:

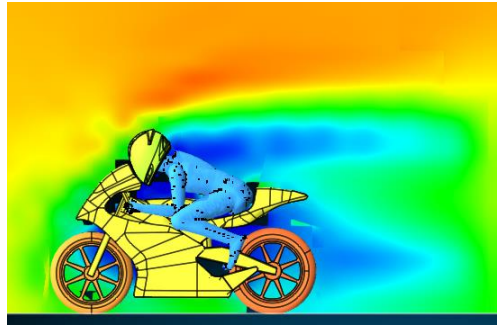
- *Modelo de turbulencia:* Automático
- *Generación de turbulencia:* Automático
- *Longitud de referencia:* 1,232 m
- *Área de referencia:* 0,427 m<sup>2</sup>
- *Dimensiones túnel de viento:* 15 x 4 x 6 m
- *Velocidad de la moto:* 38,8 m/s
- *Densidad de referencia:* 1,225 kg/m<sup>3</sup>
- *Temperatura de operación:* 288,15 K
- *Viscosidad dinámica:* 1,7894x10<sup>-5</sup> Pas
- *Tiempo de simulación:* 1 s
- *Courant:* 1
- *Algoritmo de refinamiento:* Adaptive Refinement
- *Distancia de control de la turbulencia:* 5 m

#### 8.2.1. Ensayo 1. Moto modificada en CAD. (RS: 0,3 - TRS: 0,15)

Características del ensayo:

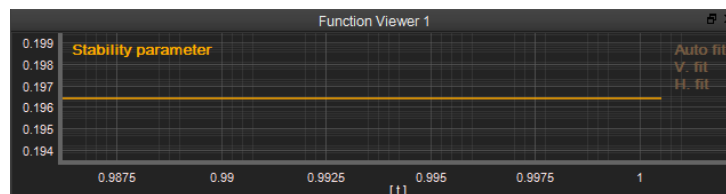
- Resolved Scale: 0,3 m
- Target Resolved Scale: 0,15 m
- Wake Resolution: 0,15 m

El tiempo de cálculo necesario para completar la simulación fue de 5 minutos, realizado con un mallado de 19.740 elementos. En los siguientes ensayos no será necesario mostrar el mallado que realiza el programa puesto que se emplearán los mismos tamaños de malla para los ensayos. La Figura 8.37 muestra la turbulencia generada en la dirección longitudinal de la moto.



**Figura 8.37** *Turbulencia Ensayo 1. Moto modificada en CAD*

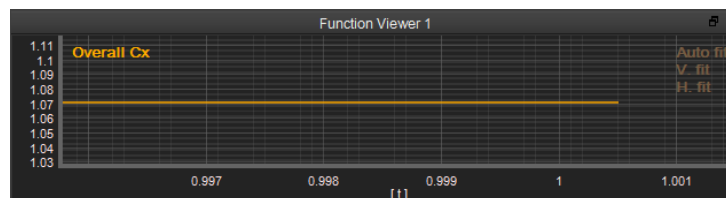
Muestra un valor del parámetro de estabilidad cercano a 0,2, por lo que se considera que el feedback del ensayo es correcto. Además, este valor se mantiene estable durante toda la simulación, tal y como se observa en la Figura 8.38.



**Figura 8.38** *Parámetro de estabilidad Ensayo 1. Moto modificada en CAD*

### **Resultados del ensayo:**

- Coeficiente de arrastre (Cx)



**Figura 8.39** *Coeficiente de arrastre Ensayo 1. Moto modificada en CAD*

Se observa en la Figura 8.39 que una vez se produce la estabilización del Cx, aunque el valor promedio del coeficiente de arrastre (1,071) es demasiado grande, debido al mallado grueso con que se ha llevado a cabo esta simulación.

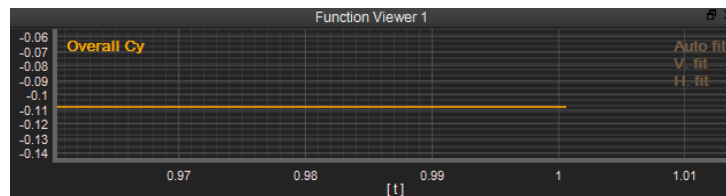
No es un dato correcto pero se utilizará para construir la gráfica de convergencia.  
 El valor de la desviación típica calculado es  $\pm 0,0001$ .

$$C_x \times A = 1,071 \times 0,427 = 0,457 \text{ m}^2$$

#### Ecuación 8.8

El valor obtenido en la operación anterior (Ecuación 8.8), como cabe esperar, es mayor que el valor de referencia de  $0,2 \text{ m}^2$ , ese aumento se debe a que el mallado no simula correctamente la geometría de la moto, generando una forma completamente diferentes.

- Coeficiente de sustentación ( $C_y$ )



**Figura 8.40** Coeficiente de sustentación Ensayo 1. Moto modificada en CAD

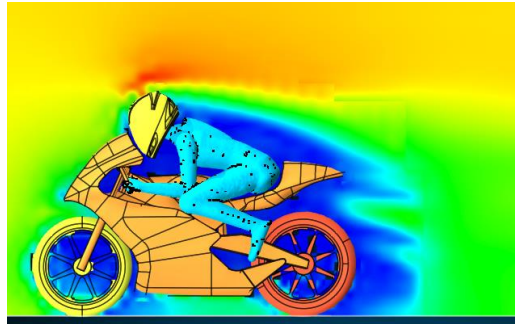
Tal y como ocurre en el estudio de convergencia de la moto original, se observa que en este primer ensayo se produce una estabilización del coeficiente de sustentación (Figura 8.40). Aunque en este caso es sustentación negativa y el valor promedio es  $-0,108$ . No es una prueba fiable debido a que el mallado no se amolda a la forma de la moto.

#### 8.2.2. Ensayo 2. Moto modificada en CAD. (RS: 0,1 - TRS: 0,05)

Características del ensayo:

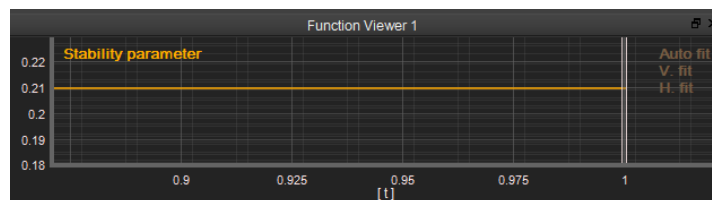
- Resolved Scale: 0,1 m
- Target Resolved Scale: 0,05 m
- Wake Resolution: 0,05 m

El tiempo de cálculo necesario para completar la simulación fue de 1 hora, realizado con un mallado de 383.638 elementos. En la Figura 8.41 se puede ver la turbulencia que se genera al paso de la moto.



**Figura 8.41** *Turbulencia Ensayo 2. Moto modificada en CAD*

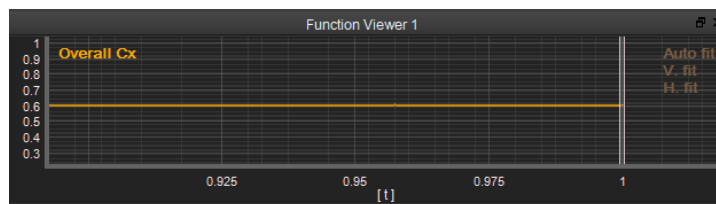
Ofrece un feedback adecuado, ya que el valor del parámetro de estabilidad durante toda la simulación se encuentra entre los valores 0 y 1. Se puede validar los cálculos de la simulación realizados por el programa. La Figura 8.42 muestra los valores del parámetro de estabilidad arrojados en un determinado intervalo de tiempo.



**Figura 8.42** *Parámetro de estabilidad Ensayo 2. Moto modificada en CAD*

### **Resultados del ensayo:**

- Coeficiente de arrastre (Cx)



**Figura 8.43** *Coeficiente de arrastre Ensayo 2. Moto modificada en CAD*

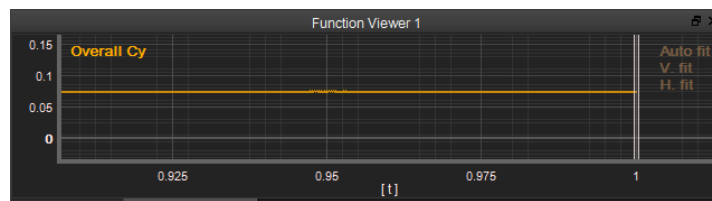
Se obtiene un valor constante de 0,602, con una desviación típica de  $\pm 0,001$ , como muestra la Figura 8.43, realizando el cálculo del coeficiente de arrastre por el área frontal se obtiene:

$$C_x \times A = 0,602 \times 0,427 = 0,257 \text{ m}^2$$

**Ecuación 8.9**

El valor obtenido en la Ecuación 8.9 no es representativo, pero se asemeja más al valor de 0,2 m<sup>2</sup>. Será necesaria la realización de más pruebas con mallado más fino, para asegurar que el valor de Cx es el adecuado.

- Coeficiente de sustentación (Cy)



**Figura 8.44** Coeficiente de sustentación Ensayo 2. Moto modificada en CAD

Como ocurre en el primer ensayo, hay una estabilización del valor (Figura 8.44) que se sabe con seguridad que no es correcta, puesto que debe aparecer una variación del valor de Cy, como se mostrará en los siguientes ensayos. El valor promedio calculado es 0,075.

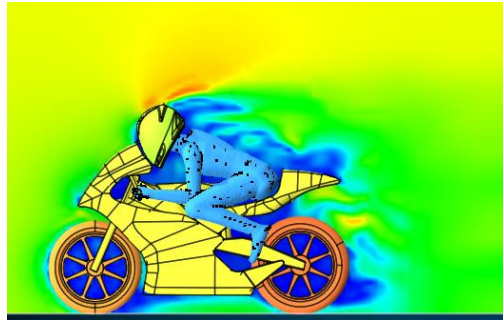
### 8.2.3. Ensayo 3. Moto modificada en CAD. (RS: 0,1 - TRS: 0,025)

Características del ensayo:

- Resolved Scale: 0,1 m
- Target Resolved Scale: 0,025 m
- Wake Resolution: 0,025 m

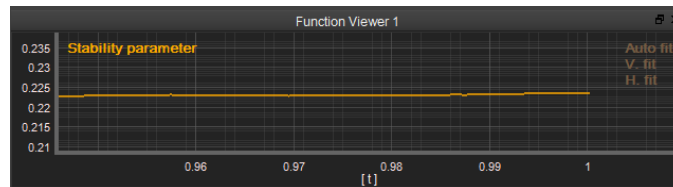


El tiempo de cálculo necesario para completar la simulación fue de 2 horas, realizado con un mallado de 464.320 elementos. La Figura 8.45 muestra la turbulencia generada por la moto en el ensayo 3.



**Figura 8.45** *Turbulencia Ensayo 3. Moto modificada en CAD*

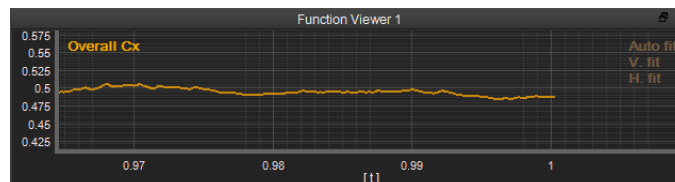
Ofrece un feedback adecuado, ya que el valor del parámetro de estabilidad (Figura 8.46) durante toda la simulación se encuentra entre los valores 0 y 1.



**Figura 8.46** *Parámetro de estabilidad Ensayo 3. Moto modificada en CAD*

### **Resultados del ensayo:**

- **Coeficiente de arrastre (Cx)**



**Figura 8.47** *Coeficiente de arrastre Ensayo 3. Moto modificada en CAD*

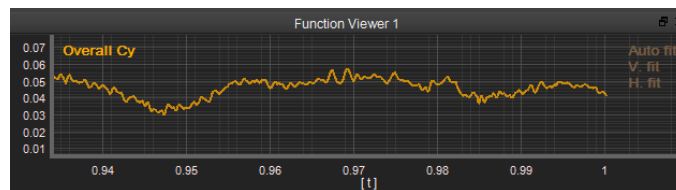
En la Figura 8.47 se observa que una vez se produce la estabilización del  $C_x$  en valores cercanos a 0,5, el valor promedio obtenido de este parámetro es de 0,501, con una desviación típica de  $\pm 0,007$ .

$$C_x \times A = 0,501 \times 0,427 = 0,214 \text{ m}^2$$

**Ecuación 8.10**

Se puede observar que conforme se va afinando el mallado alrededor de la moto, se obtiene un valor (Ecuación 8.10) cada vez más cercano al valor de referencia ( $0,2 \text{ m}^2$ ). Este ensayo ya se puede confirmar como válido y se podrían realizar las simulaciones de mejoras aerodinámicas con la base de este modelo, pero se tratará de afinar más el mallado y el número de elementos.

- Coeficiente de sustentación ( $C_y$ )



**Figura 8.48** Coeficiente de sustentación Ensayo 3. Moto modificada en CAD

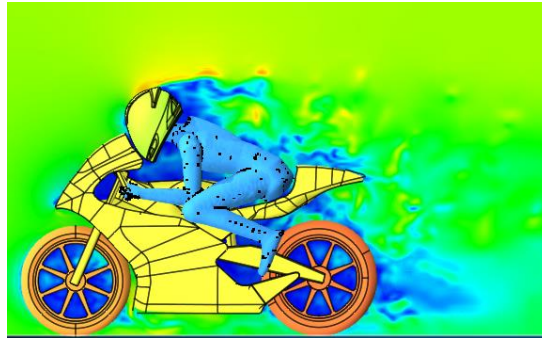
Se empieza a vislumbrar cierta variación en los resultados, como se observa en la Figura 8.48, conforme se van realizando simulaciones con mallas cada vez más finas. En este caso el valor promedio obtenido es 0,049.

#### 8.2.4. Ensayo 4. Moto modificada en CAD. (RS: 0,1 - TRS: 0,0125)

Características del ensayo:

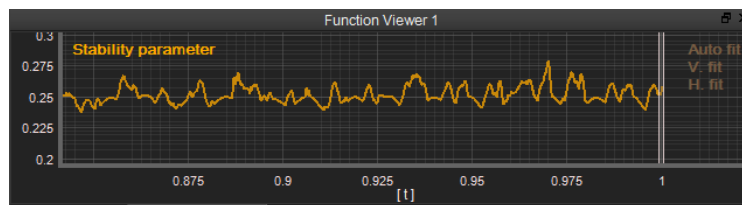
- Resolved Scale: 0,1 m
- Target Resolved Scale: 0,0125 m
- Wake Resolution: 0,0125 m

El tiempo de cálculo necesario para completar la simulación fue de 13 horas, realizado con un mallado de 959.229 elementos. La Figura 8.49 muestra la turbulencia que genera la moto en un determinado instante de tiempo.



**Figura 8.49** *Turbulencia Ensayo 4. Moto modificada en CAD*

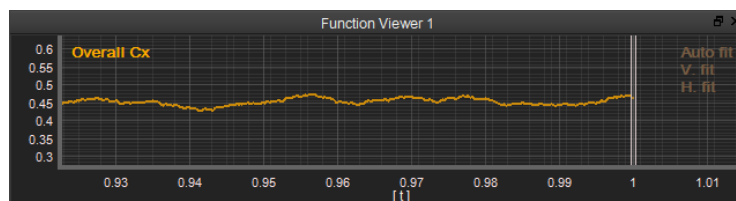
Aunque se observan una serie de picos en la Figura 8.50, ofrece un feedback adecuado, ya que estos se encuentran entre los valores de 0.2 y 0.4.



**Figura 8.50** *Parámetro de estabilidad Ensayo 4. Moto modificada en CAD*

### **Resultados del ensayo:**

- **Coeficiente de arrastre (Cx)**



**Figura 8.51** *Coeficiente de arrastre Ensayo 4. Moto modificada en CAD*

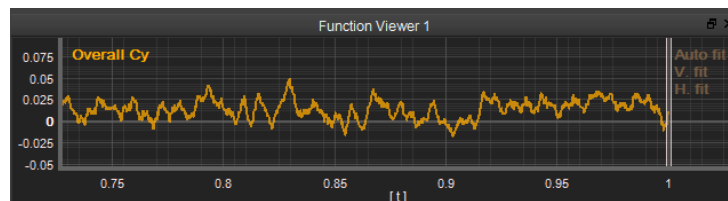
La Figura 8.51 muestra cierta estabilización en el valor de Cx, que arroja un dato promedio de 0,455, junto con una desviación típica de  $\pm 0,009$ .

$$C_x \times A = 0,455 \times 0,427 = 0,194 \text{ m}^2$$

**Ecuación 8.11**

De nuevo se obtiene un dato (Ecuación 8.11) similar al de referencia, se confirma como válido. La posible causa de que el valor obtenido sea ligeramente inferior al valor de referencia puede deberse a que la moto simulada no cuenta con entradas de aire para la admisión y refrigeración del motor, así como la ausencia de giro en las ruedas. Todas estas causas producen una disminución del coeficiente de arrastre.

- Coeficiente de sustentación (Cy)



**Figura 8.52** Coeficiente de sustentación Ensayo 4. Moto modificada en CAD

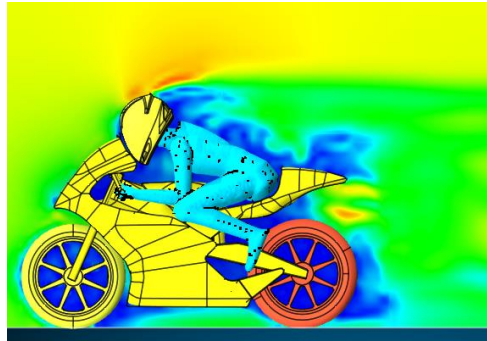
Como se muestra en la Figura 8.52, hay una fluctuación alrededor del valor cero, el valor promedio calculado es 0,014. Este ensayo se puede confirmar como válido.

#### 8.2.5. Ensayo 5. Moto modificada en CAD. (RS: 0,05 - TRS: 0,025)

Características del ensayo:

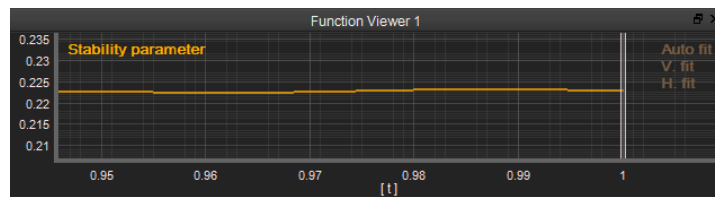
- Resolved Scale: 0,05 m
- Target Resolved Scale: 0,025 m
- Wake Resolution: 0,025 m

El tiempo de cálculo necesario para completar la simulación fue de 14 horas, realizado con un mallado de 2.960.368 elementos. La Figura 8.53 muestra la turbulencia generada por la moto.



**Figura 8.53** *Turbulencia Ensayo 5. Moto modificada en CAD*

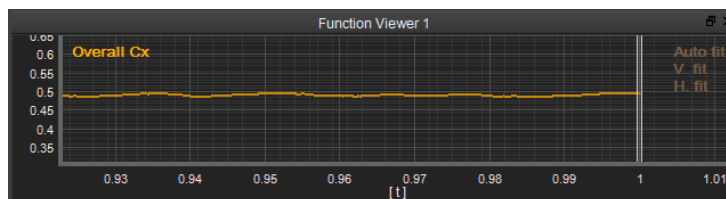
El parámetro de estabilidad se mantiene estable entre los valores 0,2 y 0,4 (Figura 8.54), por lo que se puede dar como válido el cálculo que ha realizado el programa en la simulación.



**Figura 8.54** *Parámetro de estabilidad Ensayo 5. Moto modificada en CAD*

### **Resultados del ensayo:**

- Coeficiente de arrastre (Cx)



**Figura 8.55** *Coeficiente de arrastre Ensayo 5. Moto modificada en CAD*

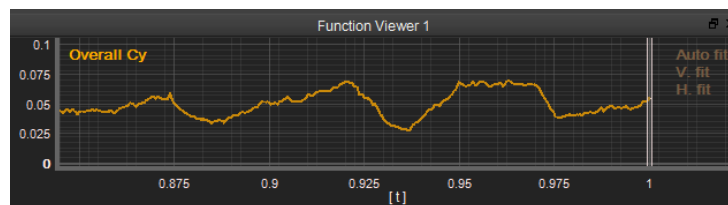
El dato promedio obtenido del coeficiente de arrastre es 0,489, con una desviación típica de  $\pm 0,005$ . En la Figura 8.55 se observa cierta estabilización del Cx.

$$C_x \times A = 0,489 \times 0,427 = 0,209 \text{ m}^2$$

#### Ecuación 8.12

El resultado obtenido en la Ecuación 8.12 se confirma como válido, en la gráfica se muestra un valor estable de  $C_x$  igual a 0,489, que al realizar la multiplicación por el área frontal, se logra un valor semejante al valor de referencia. En este ensayo se produce un error mayor que en el resto de ensayos, puesto que el valor de  $C_x$  aumenta a 0,5, cuando debería disminuir.

- Coeficiente de sustentación ( $C_y$ )



**Figura 8.56** Coeficiente de sustentación Ensayo 5. Moto modificada en CAD

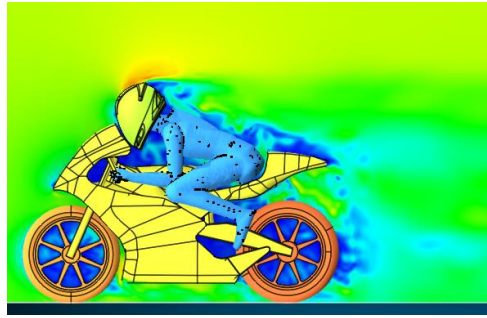
En este caso concreto existe una variación en los resultados (Figura 8.56), pero no se produce alrededor del valor cero, sino que son valores de sustentación positivos. A pesar de esto, estos valores son pequeños y cercanos a cero, puesto que la prueba es fiable. El valor promedio del coeficiente de sustentación es 0,05.

#### 8.2.6. Ensayo 6. Moto modificada en CAD. (RS: 0,05 - TRS: 0,0125)

Características del ensayo:

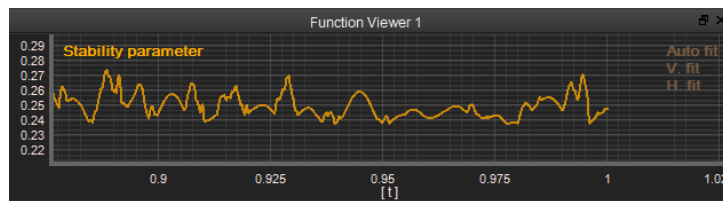
- Resolved Scale: 0,05 m
- Target Resolved Scale: 0,0125 m
- Wake Resolution: 0,0125 m

El tiempo de cálculo necesario para completar la simulación fue de 1 día, realizado con un mallado de 3.277.865 elementos. La Figura 8.57 muestra la turbulencia que se genera tras el paso de la moto.



**Figura 8.57** *Turbulencia Ensayo 6. Moto modificada en CAD*

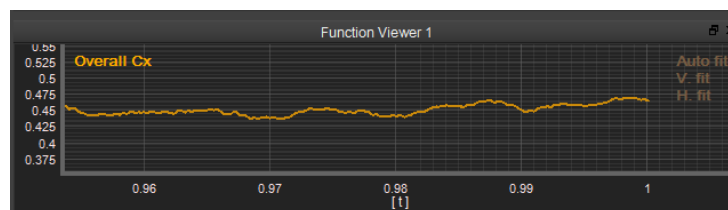
A pesar de los picos que se observan en la Figura 8.58, ofrece un feedback adecuado, ya que estos se encuentran entre los valores de 0,2 y 0,4. Por tanto, el ensayo se puede considerar como válido.



**Figura 8.58** *Parámetro de estabilidad Ensayo 6. Moto modificada en CAD*

### **Resultados del ensayo:**

- Coeficiente de arrastre (Cx)



**Figura 8.59** *Coeficiente de arrastre Ensayo 6. Moto modificada en CAD*

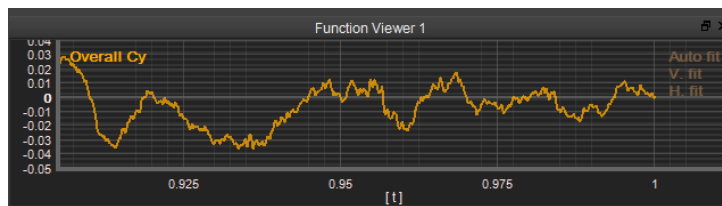
El valor promedio obtenido en esta simulación es 0,458, con una desviación típica de  $\pm 0,009$ . La Figura 8.59 muestra una estabilización de los valores de coeficiente de arrastre cercana a 0,45.

$$C_x \times A = 0,458 \times 0,427 = 0,195 \text{ m}^2$$

**Ecuación 8.13**

Ocurre como en el ensayo 4, conforme más fino es el mallado, mejor se adapta a la moto y el coeficiente de arrastre multiplicado por el área frontal (Ecuación 8.13) se asemeja más al valor de referencia, pero al no tener conductos de refrigeración, los cuales aumentan el arrastre de la moto, se obtiene un valor menor.

- Coeficiente de sustentación ( $C_y$ )



**Figura 8.60** Coeficiente de sustentación Ensayo 6. Moto modificada en CAD

El valor promedio obtenido es de -0,005, prácticamente no se genera sustentación positiva ni negativa. En la Figura 8.60 se observa las fluctuaciones que se producen alrededor del valor cero.

#### 8.2.7. Ensayo 7. Moto modificada en CAD. (RS: 0,05 - TRS: 0,00625)

Características del ensayo:

- Resolved Scale: 0,05 m
- Target Resolved Scale: 0,00625 m
- Wake Resolution: 0,00625 m

El tiempo de cálculo necesario para completar la simulación fue de 78 horas. Este ensayo se llevó a cabo en la estación de cálculo que permite el uso de hasta 24 procesadores para reducir tiempo de cálculo, aunque solo se emplearon 10 procesadores. Además debido a la limitación en el número de elementos en los que se divide la malla, fue necesario realizarlo en ese ordenador porque el número de elementos sobrepasa los 5.000.000, y la licencia que emplean los ordenadores con lo que se ha trabajado normalmente no permite un mallado tan fino. La Figura 8.61 muestra la turbulencia que genera la

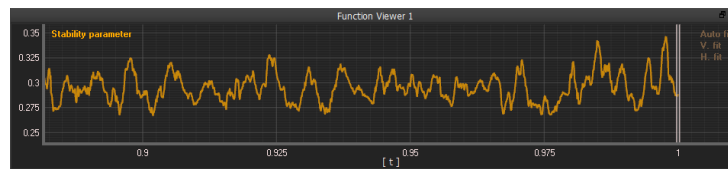


moto, aunque la tarjeta gráfica no es capaz de mostrar correctamente la estela que se genera.



**Figura 8.61** *Turbulencia Ensayo 7. Moto modificada en CAD*

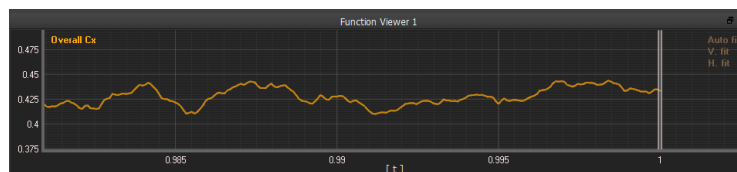
A pesar de las variaciones que se producen en el valor del parámetro de estabilidad (Figura 8.62), éstas se encuentran dentro de los márgenes que aseguran una simulación correcta y por tanto se puede considerar como válido.



**Figura 8.62** *Parámetro de estabilidad Ensayo 7. Moto modificada en CAD*

### Resultados del ensayo:

- Coeficiente de arrastre (Cx)



**Figura 8.63** *Coeficiente de arrastre Ensayo 7. Moto modificada en CAD*

La Figura 8.63 muestra los valores de Cx que se obtienen durante la simulación. El coeficiente de arrastre promedio obtenido es de 0,426, con una desviación típica de  $\pm 0,011$ , el dato con mayor desviación típica en este estudio,

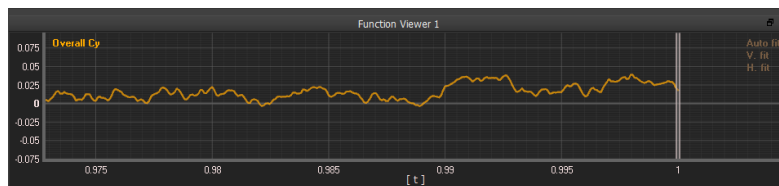
que a pesar de esto, sigue siendo un valor pequeño de desviación típica. A continuación se muestra el cálculo del coeficiente de arrastre por el área frontal de la moto (Ecuación 8.14):

$$C_x \times A = 0,426 \times 0,427 = 0,182 \text{ m}^2$$

**Ecuación 8.14**

Los valores obtenidos en los ensayos 4, 5, 6 y 7 muestran una estabilización del valor de  $C_x$ . El mallado en estas pruebas ya es suficientemente fino y se adapta correctamente a la moto, es por este motivo por el que se tiende a estabilizar el coeficiente de arrastre. En la gráfica de convergencia se podrá observar con mayor precisión este fenómeno.

- Coeficiente de sustentación ( $C_y$ )



**Figura 8.64** Coeficiente de sustentación Ensayo 7. Moto modificada en CAD

Se comprueba de nuevo todo lo comentado anteriormente, la moto no es un elemento sustentador y genera una variación del coeficiente de sustentación alrededor del valor cero. En esta prueba, el valor promedio calculado es 0,018. En la Figura 8.64 se observa que los valores arrojados son cercanos a cero.

### 8.2.8. Convergencia de los resultados. Moto modificada en CAD

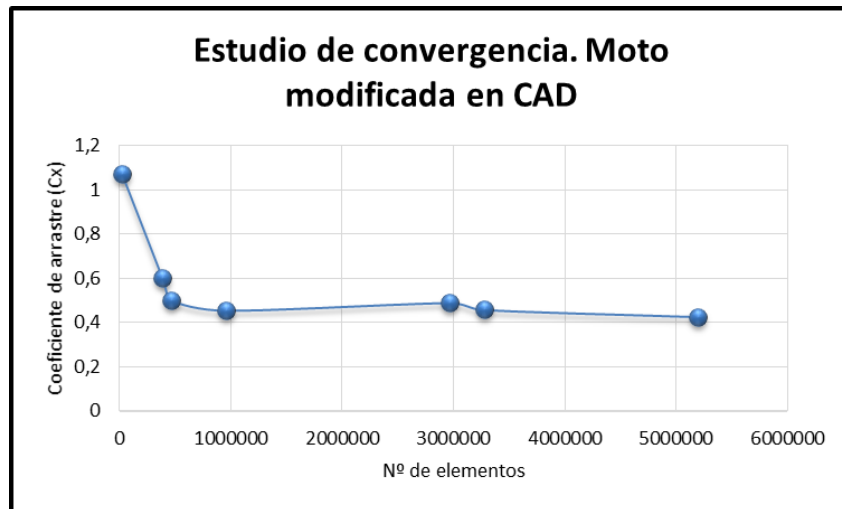
En primer lugar se presenta una tabla (Figura 8.65) con los resultados obtenidos en todos los ensayos:

Estudio de convergencia. Moto modificada en CAD							
Ensayos	Resolved scale (m)	Target resolved scale (m)	Wake resolution (m)	Nº elementos	Cx	Cy	t cálculo
Ensayo 1	0,3	0,15	0,15	19740	1,071	-0,108	5 min
Ensayo 2	0,1	0,05	0,05	383638	0,602	0,075	1 h
Ensayo 3	0,1	0,025	0,025	464320	0,501	0,049	2 h
Ensayo 4	0,1	0,0125	0,0125	959229	0,455	0,014	13 h
Ensayo 5	0,05	0,025	0,025	2960368	0,489	0,05	14 h
Ensayo 6	0,05	0,0125	0,0125	3277865	0,458	-0,005	24 h
Ensayo 7	0,05	0,00625	0,00625	5194063	0,426	0,018	78 h

**Figura 8.65** Resultados de los ensayos. Moto modificada en CAD

Como se muestra a continuación en la gráfica, donde se comparan los diferentes coeficientes de arrastre obtenidos según el mallado seleccionado para llevar a cabo la simulación, se observa que es una gráfica similar a la obtenida con el archivo de la moto original. Hay que destacar que una vez se produce la estabilización de los resultados, los valores obtenidos de Cx son ligeramente superiores a los correspondientes ensayos de la anterior prueba de convergencia, siendo un valor aproximado de 0.45.

El pequeño error cometido en el cálculo del coeficiente de arrastre se subsana cuando se realiza la multiplicación de este valor por el área frontal de la moto, consiguiéndose un valor de 0,195 m<sup>2</sup>, por lo que se confirma que este estudio de convergencia (Figura 8.66) es correcto debido a la similitud de este valor con el dato de referencia.



**Figura 8.66** Gráfica de convergencia. Moto modificada en CAD

Junto con el análisis de los otros estudios de convergencia, en el apartado 8.4 se seleccionará uno de los ensayos, para emplearlo como modelo base en posteriores simulaciones.

### 8.3. Estudio de convergencia de la moto con las ruedas en movimiento

A continuación se muestran los ensayos realizados con las ruedas en movimiento, este estudio es el último que se realizará para la convergencia de los datos obtenidos. Se seleccionará el modelo base con el que se trabajará a partir del siguiente apartado, para ello se tendrán en cuenta los resultados obtenidos en los tres estudios de convergencia.

Los archivos de CAD empleados en este estudio son los mismos que se utilizaron en el estudio anterior, la diferencia entre ambos es que en este caso, se le aplica un movimiento rotacional a las ruedas, para asemejar a la realidad la turbulencia que generan estos elementos sobre el conjunto de la moto.

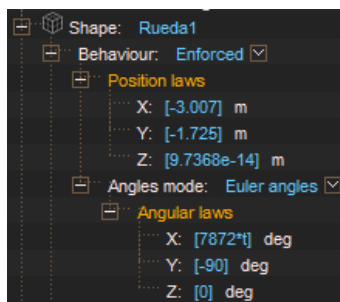
Previamente a profundizar en los diferentes ensayos que se llevaron a cabo, se va a explicar cómo dar movimiento a las ruedas. En primer lugar hay que destacar que las ruedas son de diferente tamaño, la rueda delantera tiene

un diámetro de 564,8 milímetros y la rueda trasera 592,8 milímetros. Por tanto las velocidades angulares teniendo en cuenta que la moto circula a 140 km/h (38,8 m/s) se calculan con la Ecuación 8.15 que relaciona la velocidad lineal con la velocidad angular:

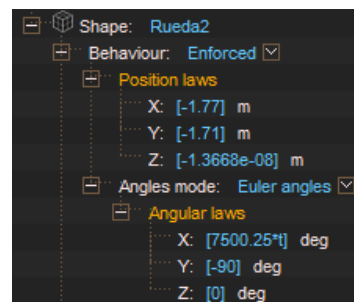
$$V = \omega \times R$$

**Ecuación 8.15**

Obteniéndose 137,39 rad/s y 130,9 rad/s respectivamente. A la hora de ejecutar estas velocidades angulares en el programa XFlow™, hay que tener en cuenta que se deben poner en grados/s, por lo que, realizando el cambio de radianes a grados, se obtiene una velocidad de la rueda delantera de 7872 grados/s y una velocidad angular de la rueda trasera de 7500,25 grados/s. Una vez calculadas las velocidades angulares, en el programa hay que seleccionar el comportamiento “*Enforced*” para ambas ruedas, esto permitirá introducir los valores de la velocidad angular en el apartado “*Angular laws*”, donde se añadirá el correspondiente valor multiplicado por el tiempo. En la Figura 8.67 se muestra lo comentado anteriormente.



a) Rueda delantera



b) Rueda trasera

**Figura 8.67** Posiciones y velocidad angular de las ruedas

El resto de los apartados son similares a los realizados en cada uno de los ensayos, es necesario que sea así, para obtener coherencia en los diferentes estudios, ya que se trata de ir aproximando la motocicleta a un comportamiento más acorde a la realidad, pero obteniendo una gráfica de convergencia lo más similar posible entre los tres estudios:

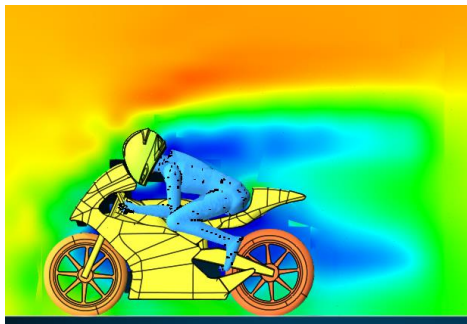
- *Modelo de turbulencia:* Automático
- *Generación de turbulencia:* Automático
- *Longitud de referencia:* 1,232 m
- *Área de referencia:* 0,427 m<sup>2</sup>
- *Dimensiones túnel de viento:* 15 x 4 x 6 m
- *Velocidad de la moto:* 38,8 m/s
- *Densidad de referencia:* 1,225 kg/m<sup>3</sup>
- *Temperatura de operación:* 288,15 K
- *Viscosidad dinámica:* 1,7894x10<sup>-5</sup> Pas
- *Tiempo de simulación:* 1 s
- *Courant:* 1
- *Algoritmo de refinamiento:* Adaptive Refinement
- *Distancia de control de la turbulencia:* 5 m

#### 8.3.1. Ensayo 1. Moto con ruedas en movimiento. (RS: 0,3 - TRS: 0,15)

Características del ensayo:

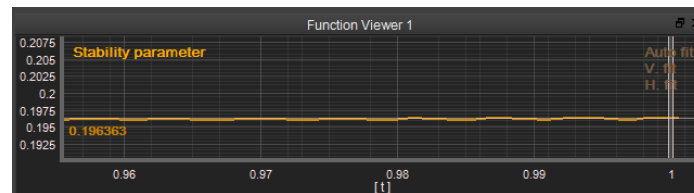
- Resolved Scale: 0,3 m
- Target Resolved Scale: 0,15 m
- Wake Resolution: 0,15 m

El tiempo de cálculo necesario para completar la simulación fue de 8 minutos, realizado con un mallado de 18.979 elementos. En la Figura 8.68 muestra la turbulencia que generaba la moto.



**Figura 8.68** *Turbulencia Ensayo 1. Moto con ruedas en movimiento*

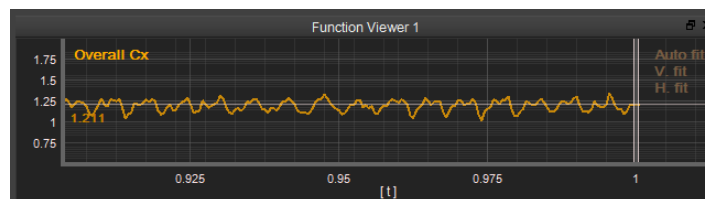
Se considera correcta la prueba puesto que el parámetro de estabilidad se mantiene estable en un valor cercano a 0,2, como se observa en la Figura 8.69 pero como se verá a continuación, los resultados obtenidos no se asemejan a la realidad.



**Figura 8.69** *Parámetro de estabilidad Ensayo 1. Moto con ruedas en movimiento*

### Resultados del ensayo:

- Coeficiente de arrastre (Cx)



**Figura 8.70** *Coeficiente de arrastre Ensayo 1. Moto con ruedas en movimiento*

Los resultados muestran mayor variación (Figura 8.70) que en los primeros ensayos de los anteriores estudios, esto se debe principalmente al movimiento de las ruedas, y ocurrirá en los siguientes ensayos también. El valor promedio 1,223 es demasiado grande y su desviación típica es de  $\pm 0,717$ , también demasiado grande debido al mallado grueso que no se amolda perfectamente a la forma de la moto.

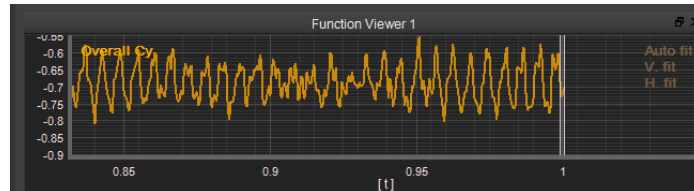
$$C_x \times A = 1,223 \times 0,427 = 0,522 \text{ m}^2$$

**Ecuación 8.16**

El valor obtenido en la Ecuación 8.16, como cabe esperar, es mayor que el valor de referencia de  $0,2 \text{ m}^2$ , ese aumento se debe a que el mallado no simula

correctamente la geometría de la moto, generando una forma completamente diferentes.

- Coeficiente de sustentación ( $C_y$ )



**Figura 8.71** Coeficiente de sustentación Ensayo 1. Moto con ruedas en movimiento

En los siguientes ensayos en los que las ruedas están en movimiento, ya se ha comentado en el apartado del coeficiente de arrastre que se producen fluctuaciones mayores en los resultados obtenidos, lo mismo ocurrirá con el coeficiente de sustentación. El valor promedio calculado en este ensayo es -0,717, en la Figura 8.71 se puede ver las fluctuaciones producidas que se producen en la sustentación.

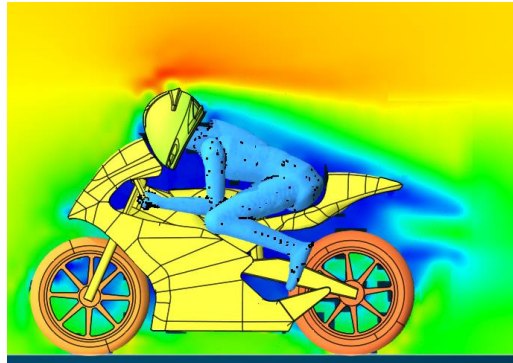
### 8.3.2. Ensayo 2. Moto con ruedas en movimiento. (RS: 0,1 - TRS: 0,05)

Características del ensayo:

- Resolved Scale: 0,1 m
- Target Resolved Scale: 0,05 m
- Wake Resolution: 0,05 m

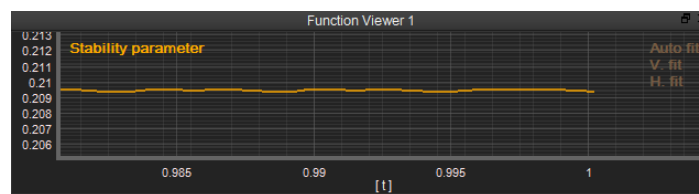
El tiempo de cálculo necesario para completar la simulación fue de 1,5 horas, realizado con un mallado de 383.878 elementos. La Figura 8.72 muestra la turbulencia que se genera debido a la presencia de la moto.





**Figura 8.72** *Turbulencia Ensayo 2. Moto con ruedas en movimiento*

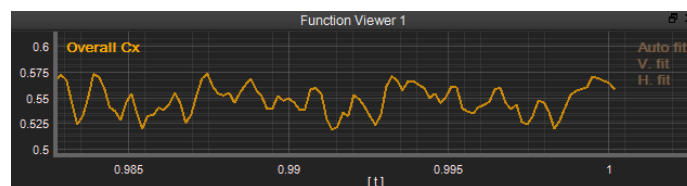
Ofrece un feedback adecuado, ya que el valor del parámetro de estabilidad durante toda la simulación se encuentra entre los valores 0 y 1 (Figura 8.73). Se puede validar los cálculos de la simulación realizados por el programa.



**Figura 8.73** *Parámetro de estabilidad Ensayo 2. Moto con ruedas en movimiento*

### **Resultados del ensayo:**

- Coeficiente de arrastre (Cx)



**Figura 8.74** *Coeficiente de arrastre Ensayo 2. Moto con ruedas en movimiento*

En los ensayos correspondientes a este estudio de convergencia se van a producir fluctuaciones en los valores calculados, tanto del coeficiente de arrastre como del coeficiente de sustentación, la causa de esto se debe al giro de las ruedas, circunstancia que no aparecía en los estudios de convergencia previos. Realizando el valor promedio se obtiene un Cx de 0,556, con una

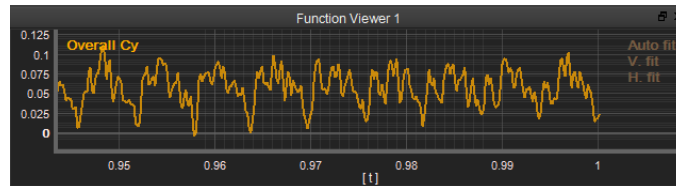
desviación típica de  $\pm 0,021$ . Este dato aún está lejos de parecerse al valor de referencia.

$$C_x \times A = 0,556 \times 0,427 = 0,237 \text{ m}^2$$

**Ecuación 8.17**

En la Ecuación 8.17 se obtiene un valor que no es representativo, pero se asemeja más al valor de  $0,2 \text{ m}^2$ . Será necesaria la realización de más pruebas con mallado más fino, para asegurar que el valor de  $C_x$  es el adecuado.

- Coeficiente de sustentación ( $C_y$ )



**Figura 8.75** Coeficiente de sustentación Ensayo 2. Moto con ruedas en movimiento

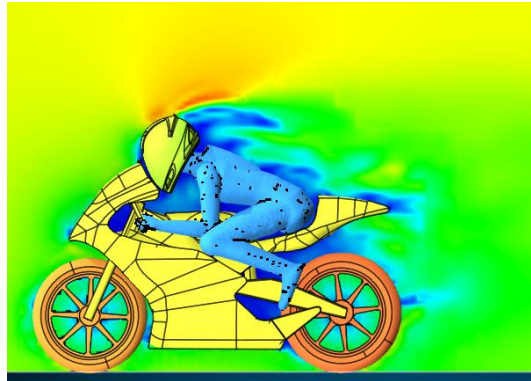
Como se ha comentado en el ensayo anterior, el giro de las ruedas producirá una oscilación en los resultados obtenidos, en este caso, el valor promedio es  $0,021$ . En la Figura 8.75 se observan los resultados obtenidos en el coeficiente de sustentación del Ensayo 2.

### 8.3.3. Ensayo 3. Moto con ruedas en movimiento. (RS: 0,1 - TRS: 0,025)

Características del ensayo:

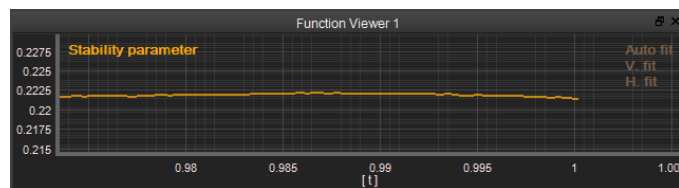
- Resolved Scale:  $0,1 \text{ m}$
- Target Resolved Scale:  $0,025 \text{ m}$
- Wake Resolution:  $0,025 \text{ m}$

El tiempo de cálculo necesario para completar la simulación fue de 4 horas, realizado con un mallado de 467.692 elementos. En la Figura 8.76 se muestra la turbulencia generada por la moto.



**Figura 8.76** *Turbulencia Ensayo 3. Moto con ruedas en movimiento*

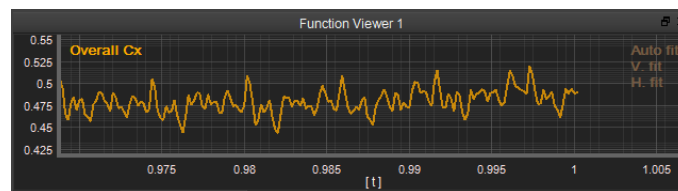
Ofrece un parámetro de estabilidad adecuado y cercano al valor 0,22, tal y como se observa en la Figura 8.77 que permite asegurar que el cálculo realizado es correcto.



**Figura 8.77** *Parámetro de estabilidad Ensayo 3. Moto con ruedas en movimiento*

### **Resultados del ensayo:**

- Coeficiente de arrastre (Cx)



**Figura 8.78** *Coeficiente de arrastre Ensayo 3. Moto con ruedas en movimiento*

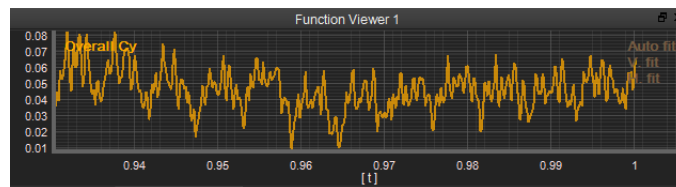
De nuevo se observa una fluctuación en los valores de Cx obtenidos (Figura 8.78), como se ha comentado antes, esto se debe al giro de las ruedas, que generan gran turbulencia. Realizando el valor promedio se obtiene un Cx de 0,493, con una desviación típica de  $\pm 0,014$ .

$$C_x \times A = 0,493 \times 0,427 = 0,211 \text{ m}^2$$

**Ecuación 8.18**

Se puede observar que conforme se va afinando el mallado alrededor de la moto, se obtiene un valor cada vez más cercano al valor de referencia (0,2 m<sup>2</sup>). Este ensayo ya se puede confirmar como válido y se podrían realizar las simulaciones de mejoras aerodinámicas con la base de este modelo, pero se tratará de afinar más el mallado y el número de elementos. La Ecuación 8.18 muestra la multiplicación del coeficiente de arrastre y el área de referencia de la moto.

- Coeficiente de sustentación (Cy)



**Figura 8.79** Coeficiente de sustentación Ensayo 3. Moto con ruedas en movimiento

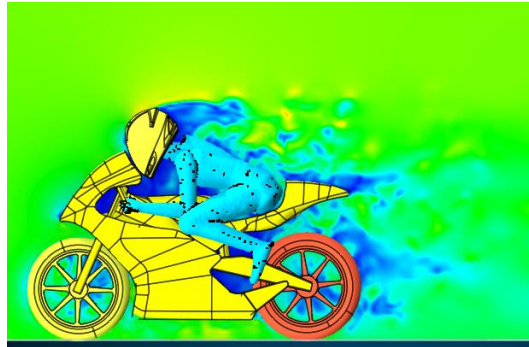
El valor promedio de Cy es 0,053. De nuevo, se observan grandes fluctuaciones en los resultados de la simulación, tal y como se ve en la Figura 8.79.

**8.3.4. Ensayo 4. Moto con ruedas en movimiento. (RS: 0,1 - TRS: 0,0125)**

Características del ensayo:

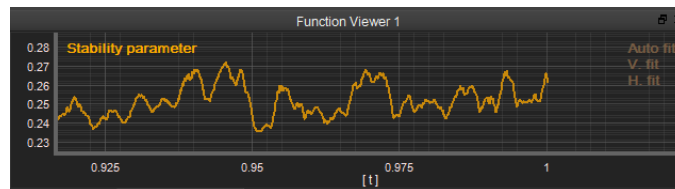
- Resolved Scale: 0,1 m
- Target Resolved Scale: 0,0125 m
- Wake Resolution: 0,0125 m

El tiempo de cálculo necesario para completar la simulación fue de 23 horas, realizado con un mallado de 799.068 elementos. La Figura 8.80 muestra la estela de aire turbulento que se genera.



**Figura 8.80** *Turbulencia Ensayo 4. Moto con ruedas en movimiento*

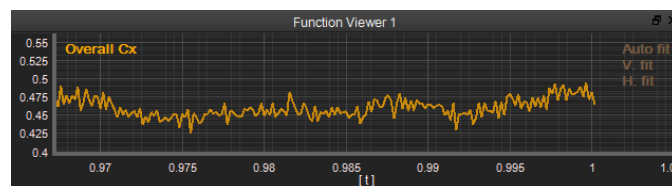
Aunque se observan una serie de picos en la Figura 8.81, ofrece un feedback adecuado, ya que estos se encuentran entre los valores de 0,2 y 0,4.



**Figura 8.81** *Parámetro de estabilidad Ensayo 4. Moto con ruedas en movimiento*

### Resultados del ensayo:

- Coeficiente de arrastre (Cx)



**Figura 8.82** *Coeficiente de arrastre Ensayo 4. Moto con ruedas en movimiento*

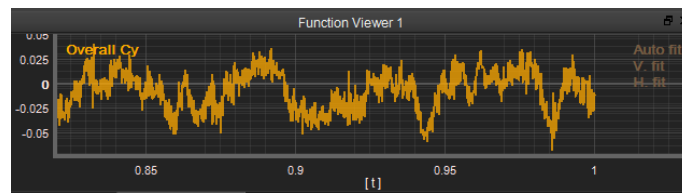
En la Figura 8.82 se observa unos valores de Cx ligeramente superiores a 0,45, el valor promedio obtenido referente al coeficiente de arrastre es 0,483, con una desviación típica de  $\pm 0,0007$ .

$$C_x \times A = 0,483 \times 0,427 = 0,206 \text{ m}^2$$

**Ecuación 8.19**

De nuevo se obtiene mediante la Ecuación 8.19 un dato similar al de referencia, se confirma como válido. La posible causa de que el valor obtenido sea ligeramente inferior al valor de referencia puede deberse a que la moto simulada no cuenta con entradas de aire para la admisión y refrigeración del motor, ya que éstas producen un mayor arrastre y turbulencia.

- Coeficiente de sustentación ( $C_y$ )



**Figura 8.83** Coeficiente de sustentación Ensayo 4. Moto con ruedas en movimiento

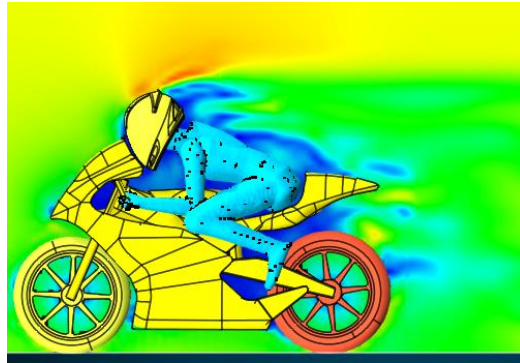
El valor promedio calculado de  $C_y$  es cero, ya que como se observa en la Figura 8.83, la oscilación se produce alrededor de este valor, dejando constancia de que la moto no ejerce sustentación positiva ni negativa.

#### 8.3.5. Ensayo 5. Moto con ruedas en movimiento. (RS: 0,05 - TRS: 0,025)

Características del ensayo:

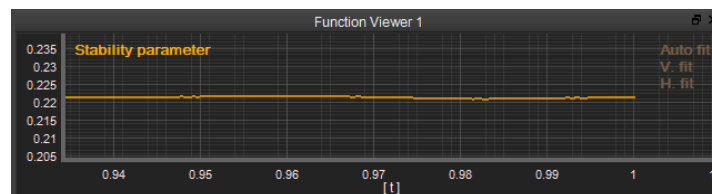
- Resolved Scale: 0,05 m
- Target Resolved Scale: 0,025 m
- Wake Resolution: 0,025 m

El tiempo de cálculo necesario para completar la simulación fue de 14 horas, realizado con un mallado de 2.960.368 elementos. En la Figura 8.84 se ve la turbulencia generada por la moto.



**Figura 8.84** *Turbulencia Ensayo 5. Moto con ruedas en movimiento*

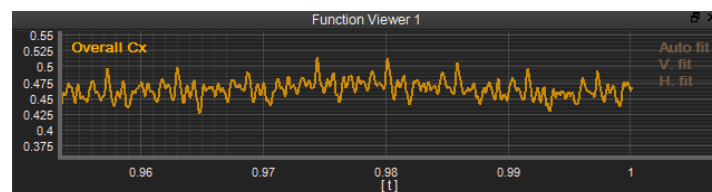
El parámetro de estabilidad se mantiene estable entre los valores 0,2 y 0,4, tal y como se puede ver en la Figura 8.85, por lo que se puede dar como válido el cálculo que ha realizado el programa en la simulación.



**Figura 8.85** *Parámetro de estabilidad Ensayo 5. Moto con ruedas en movimiento*

### **Resultados del ensayo:**

- **Coeficiente de arrastre (Cx)**



**Figura 8.86** *Coeficiente de arrastre Ensayo 5. Moto con ruedas en movimiento*

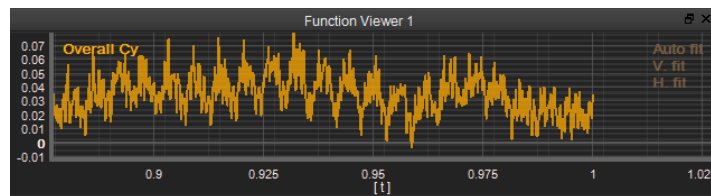
La Figura 8.86 muestra los valores del coeficiente de arrastre obtenidos en un intervalo de tiempo de la simulación. El valor promedio del coeficiente de arrastre es 0,477, con una desviación típica de  $\pm 0,014$ :

$$C_x \times A = 0,477 \times 0,427 = 0,204 \text{ m}^2$$

**Ecuación 8.20**

El valor obtenido es similar al valor de referencia (Ecuación 8.20.), por lo que el ensayo se puede asegurar que es correcto y toma valores adecuados con las pruebas reales. Cabe destacar que si se compara este ensayo con el ensayo 5 de la moto original, se obtiene un mayor valor de  $C_x$ , que se debe al movimiento de las ruedas y que a su vez permite obtener un dato más cercano a  $0,2 \text{ m}^2$  cuando se multiplica por el área frontal.

- Coeficiente de sustentación ( $C_y$ )



**Figura 8.87** Coeficiente de sustentación Ensayo 5. Moto con ruedas en movimiento

En este ensayo, la oscilación no se produce alrededor de cero, pero se mantiene en valores cercanos a éste, se observa claramente en la Figura 8.87 el promedio es 0,036.

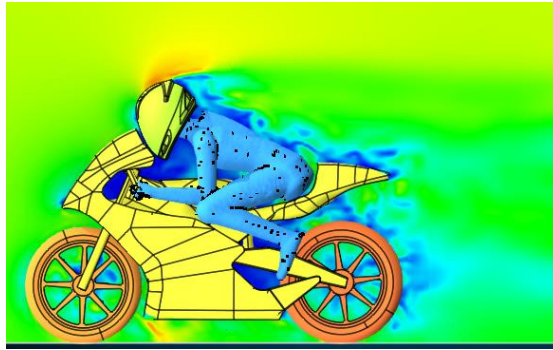
### 8.3.6. [Ensayo 6. Moto con ruedas en movimiento.\(RS:0,05 - TRS: 0,0125\)](#)

Características del ensayo:

- Resolved Scale: 0,05 m
- Target Resolved Scale: 0,0125 m
- Wake Resolution: 0,0125 m

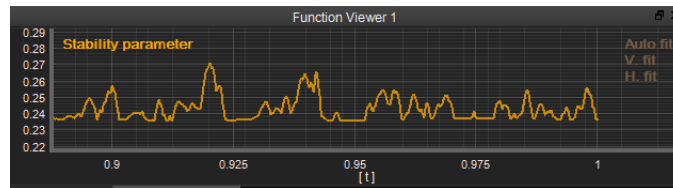
El tiempo de cálculo necesario para completar la simulación fue de 1 día, realizado con un mallado de 3.277.865 elementos. La Figura 8.88 muestra la turbulencia que se genera en el aire debido al paso de la moto.





**Figura 8.88** *Turbulencia Ensayo 6. Moto con ruedas en movimiento*

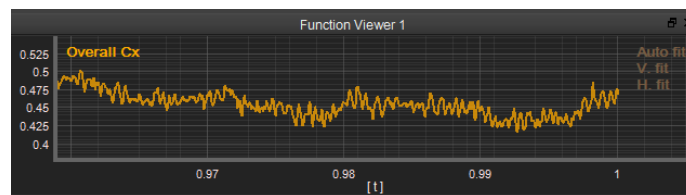
Se observan picos en la Figura 8.89 pero a pesar de este hecho, ofrece un feedback adecuado, ya que estos se encuentran entre los valores de 0,2 y 0,4. Por tanto, el ensayo se puede considerar como válido.



**Figura 8.89** *Parámetro de estabilidad Ensayo 6. Moto con ruedas en movimiento*

### **Resultados del ensayo:**

- **Coeficiente de arrastre (Cx)**



**Figura 8.90** *Coeficiente de arrastre Ensayo 6. Moto con ruedas en movimiento*

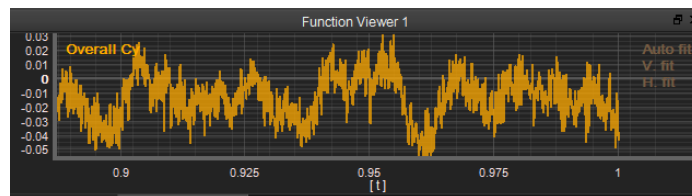
Como ya se ha comentado anteriormente, se producen fluctuaciones en los resultados debido al giro de las ruedas, el valor promedio calculado es 0,474, con una desviación típica de  $\pm 0,015$ .

$$C_x \times A = 0,474 \times 0,427 = 0,202 \text{ m}^2$$

**Ecuación 8.21**

De nuevo se obtiene un valor cercano al de referencia en la Ecuación 8.21, confirma lo comentado en los anteriores ensayos de este estudio, que el giro de las ruedas permite asemejar la simulación a los resultados obtenidos en ensayos reales.

- Coeficiente de sustentación ( $C_y$ )



**Figura 8.91** Coeficiente de sustentación Ensayo 6. Moto con ruedas en movimiento

El valor promedio obtenido en el ensayo 6 es -0,023, un valor muy cercano al cero. La Figura 8.91 muestra los valores del coeficiente de sustentación en determinados instantes de tiempo.

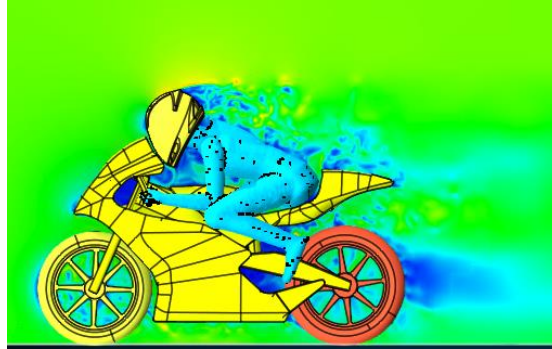
### 8.3.7. Ensayo 7. Moto con ruedas en movimiento. (RS:0,05 -TRS: 0,00625)

Características del ensayo:

- Resolved Scale: 0,05 m
- Target Resolved Scale: 0,00625 m
- Wake Resolution: 0,00625 m

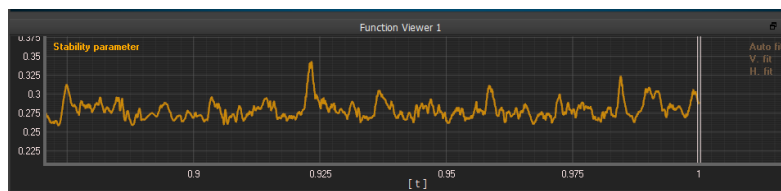
Al igual que el ensayo 7 de la moto modificada, esta prueba se llevó a cabo en la estación de cálculo, el tiempo requerido para completar la simulación fue de 140 horas, empleando 10 procesadores de los 24 disponibles. Se realizó en la estación por la limitación en el número de elementos que pueden ejecutar las licencias de los ordenadores con los que se trabaja habitualmente. El número de elementos en los que se dividió la malla fue superior a 5.150.000. En la Figura

8.92 se puede ver la turbulencia que se generó en un determinado instante de tiempo.



**Figura 8.92** *Turbulencia Ensayo 7. Moto con ruedas en movimiento*

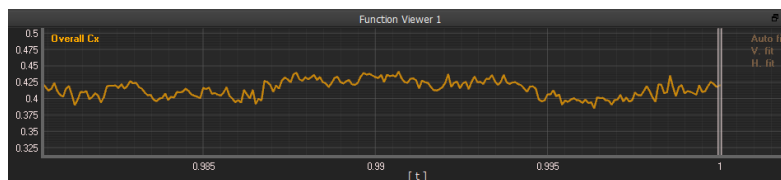
A pesar de las variaciones que se muestran en la Figura 8.93 del parámetro de estabilidad, éstas se encuentran dentro de los márgenes que aseguran que el cálculo realizado en la simulación es correcto y por tanto se puede considerar como válido.



**Figura 8.93** *Parámetro de estabilidad Ensayo 7. Moto con ruedas en movimiento*

### Resultados del ensayo:

- Coeficiente de arrastre ( $C_x$ )



**Figura 8.94** *Coeficiente de arrastre Ensayo 7. Moto con ruedas en movimiento*

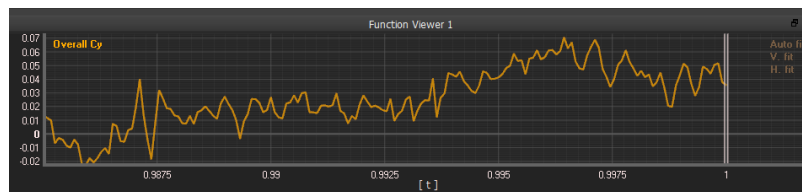
El coeficiente de arrastre promedio obtenido es de 0,406, con una desviación típica de  $\pm 0,014$ . En la Figura 8.94 se observa el coeficiente de arrastre obtenido durante un intervalo de tiempo.

$$C_x \times A = 0,406 \times 0,427 = 0,173 \text{ m}^2$$

#### Ecuación 8.22

El valor obtenido en la Ecuación 8.22 es relativamente más pequeño que el valor de referencia, en los ensayos anteriores, concretamente en el 4, 5 y 6, los resultados se asemejaban al valor de 0,2 m<sup>2</sup>. Este ensayo por tanto se tomará como válido pero no se utilizarán en posteriores cálculos, ya que además de sobrepasar el número de elementos con los que se puede trabajar en condiciones normales puede que haya surgido un error debido a un mallado tan fino. Será suficiente con realizar un mallado como el del ensayo 6 en los ensayos que se realizarán más adelante.

- Coeficiente de sustentación (Cy)



**Figura 8.95** Coeficiente de sustentación Ensayo 7. Moto con ruedas en movimiento

Se observa que en el último tramo de la simulación (Figura 8.95), se produce un aumento en el coeficiente de sustentación, a pesar de este fenómeno, el valor promedio obtenido es de 0,022, que como en anteriores ensayos, muestra que la moto genera muy poca sustentación.

#### 8.3.8. Convergencia de los resultados. Moto con ruedas en movimiento

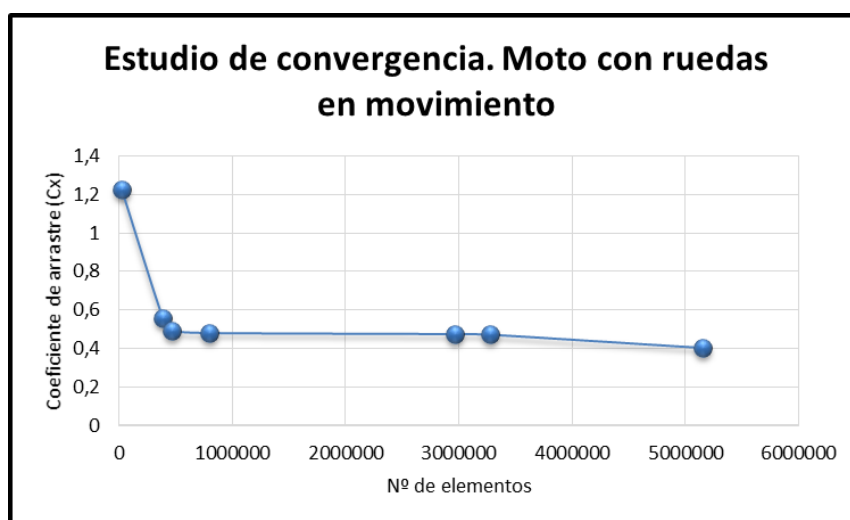
A continuación se resume en Figura 8.96 los resultados obtenidos en las pruebas llevadas a cabo en este apartado:

Estudio de convergencia. Moto con ruedas en movimiento							
Ensayos	Resolved scale (m)	Target resolved scale (m)	Wake resolution (m)	Nº elementos	Cx	Cy	t cálculo
Ensayo 1	0,3	0,15	0,15	18979	1,223	-0,717	8 min
Ensayo 2	0,1	0,05	0,05	383878	0,556	0,021	1.5 h
Ensayo 3	0,1	0,025	0,025	467692	0,493	0,053	4 h
Ensayo 4	0,1	0,0125	0,0125	799068	0,483	0	23 h
Ensayo 5	0,05	0,025	0,025	2960368	0,477	0,036	14 h
Ensayo 6	0,05	0,0125	0,0125	3277865	0,474	-0,023	24 h
Ensayo 7	0,05	0,00625	0,00625	5150000	0,406	0,022	140 h

**Figura 8.96** Resultados de los ensayos. Moto con ruedas en movimiento

En este apartado se estudian conjuntamente todos los resultados obtenidos en los ensayos anteriores referentes a la moto con las ruedas en movimiento, concretamente, se trata de nuevo de realizar una gráfica de convergencia que muestre el coeficiente de arrastre obtenido frente al número de elementos de malla que generaba el programa.

Como en los dos estudios de convergencia anteriores, la gráfica comienza con valores altos de Cx con un número relativamente bajo de elementos, es decir con una malla gruesa que no se amolda a la forma de la moto, para después ir disminuyendo ese valor de coeficiente de arrastre hasta que se produce una estabilización en valores cercanos a 0,4. Cabe señalar el resultado del ensayo 7 alcanza un valor demasiado bajo en comparación con las otras pruebas, por tanto queda descartado, aunque se añadirá el resultado en la gráfica.

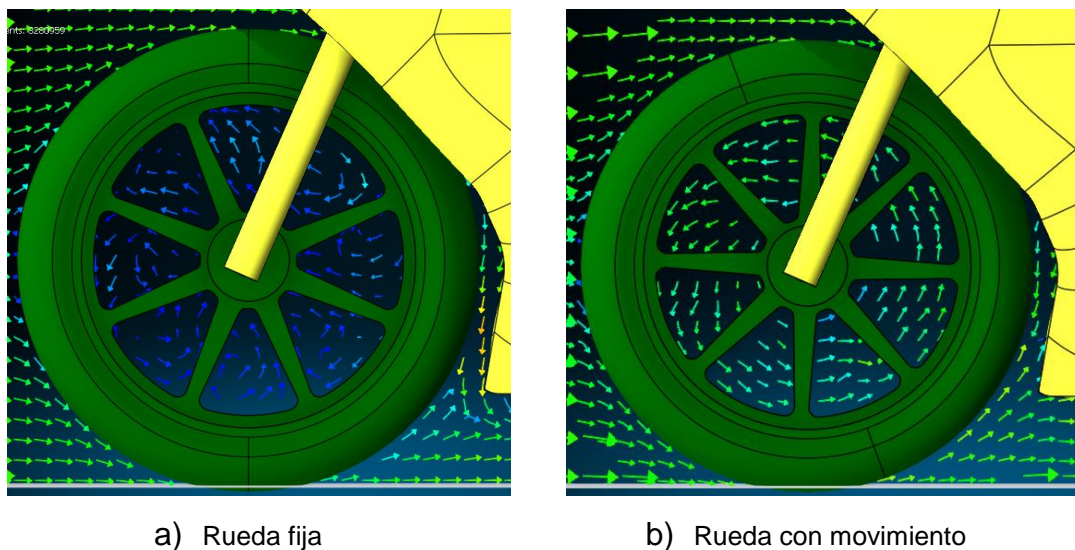


**Figura 8.97** Gráfica de convergencia. Moto con ruedas en movimiento

Como se muestra en la Figura 8.97, la estabilización comienza a producirse en el ensayo 3, a partir de ese punto, los demás resultados arrojan valores similares de  $C_x$ , excepto como se señaló antes, el ensayo 7. En el siguiente apartado se analizarán los resultados de los tres estudios de convergencia para seleccionar un ensayo cuyos parámetros se utilizarán en un modelo base para la ejecución de pruebas posteriores.

Además de analizar los resultados obtenidos en el estudio de convergencia de la moto con las ruedas en movimiento, también es interesante estudiar gráficamente el aire alrededor de las ruedas, comparando las ruedas fijas de los dos primeros estudios de convergencia y las ruedas con movimiento de este estudio.

La Figura 8.98 muestra el flujo de aire en un plano ubicado en el centro de la llanta.



**Figura 8.98.** *Flujo de aire en rueda fija y rueda con movimiento*

Se observa que la turbulencia en la rueda fija no sigue un orden concreto, simplemente se generan torbellinos porque el neumático y la llanta suponen un obstáculo para el avance del aire. Por su parte, en la llanta con movimiento

rotacional, se observa que la rueda genera un giro en el flujo de aire que entra en contacto con ella, obteniéndose un perfil muy diferente al de la rueda fija.

#### 8.4. Selección de los parámetros del modelo

Una vez estudiados los resultados de los tres estudios de convergencia, así como la realización de las gráficas que facilitan el análisis, se comprueba que la estabilización en valores cercanos a 0,4 se produce a partir del ensayo 3 en cada uno de los tres estudios. Por tanto la posible elección del modelo base se divide entre los ensayos 4, 5, 6, 7. Analizando el tiempo de cálculo y algunos resultados obtenidos, se descarta el ensayo 7 debido a que los tiempos de simulación son excesivamente altos y aunque se genera el mallado que mejor se adapta a la geometría de la moto, se vislumbran algunas dudas respecto a los resultados obtenidos, especialmente en el ensayo con movimiento de las ruedas.

Los valores obtenidos tanto para el coeficiente de arrastre ( $C_x$ ) como para el coeficiente de sustentación ( $C_y$ ), son similares en las simulaciones llevadas a cabo en los ensayos 4, 5, 6. En el caso del coeficiente de arrastre, cuando se realizaba la multiplicación de este parámetro por el área frontal de la moto, el resultado se asemejaba al valor de referencia ( $0,2 \text{ m}^2$ ), por tanto, cualquiera de estos tres ensayos es válido para usarlo como modelo base en los ensayos que se realicen más adelante.

Finalmente, se ha considerado seleccionar los parámetros del ensayo 6 para emplearlos en posteriores simulaciones, esta decisión se debe a que el tiempo de cálculo no se incrementa en exceso y a que realiza un buen mallado alrededor de la motocicleta.

A continuación se detallan los parámetros que configuran el modelo base:

- *Modelo de turbulencia:* Automático
- *Generación de turbulencia:* Automático
- *Longitud de referencia:* 1,232 m
- *Dimensiones túnel de viento:* 15 x 4 x 6 m
- *Densidad de referencia:* 1,225 kg/m<sup>3</sup>
- *Temperatura de operación:* 288,15 K
- *Viscosidad dinámica:* 1,7894x10<sup>-5</sup> Pas
- *Tiempo de simulación:* 1 s
- *Courant:* 1
- *Resolved scale:* 0,05 m
- *Algoritmo de refinamiento:* Adaptative Refinement
- *Target resolved scale:* 0,0125 m
- *Wake resolution:* 0,0125 m
- *Distancia de control de la turbulencia:* 5 m

El área de referencia será diferente en cada caso, debido a que no será el mismo área cuando el piloto se encuentre en posición de mínima resistencia o cuando se encuentre en posición de frenada. La velocidad de la moto también variará de un ensayo a otro, ya que se parte de alta velocidad, se frena hasta 70 km/h aproximadamente y se vuelve a acelerar hasta alta velocidad.

Por su parte, se les aplicará movimiento rotacional a las ruedas tal y como se hizo en el último estudio de convergencia. Pero dependiendo de la velocidad de la moto, tendrán diferente velocidad angular.



## **9. ESTUDIO AERODINÁMICO EN DIFERENTES SITUACIONES DE CARRERA**



## 9. ESTUDIO AERODINÁMICO EN DIFERENTES SITUACIONES DURANTE UNA CARRERA

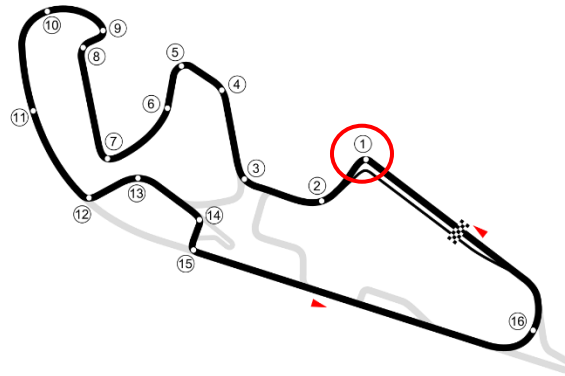
El objetivo de este apartado es la realización de varias simulaciones en diferentes situaciones en las que un piloto se encuentra normalmente durante el transcurso de una carrera, tales como el paso por una curva, momento de frenada o situación de aceleración en una recta. Además de estas tres situaciones también se analizarán los resultados obtenidos en el momento en el que un piloto aprovecha el rebufo del oponente que se encuentra delante.

Estos estudios se realizarán tanto con las llantas originales, que cuentan con radios, como con la mejora aerodinámica con la que se tratará de mejorar la eficiencia aerodinámica en las diferentes situaciones expuestas anteriormente, se contemplarán los aspectos positivos y negativos que aporta este elemento en cada una de las simulaciones, que servirán para decidir si esa mejora se acepta o se rechaza.

Debido a que la competición de Motostudent se desarrolla en el circuito de MotorLand en Aragón, se ha creído conveniente realizar estos estudios en diferentes situaciones en este circuito. Concretamente, al tratarse de varias situaciones que podrían ocurrir de manera escalonada al trazar una curva tras atravesar una recta, las situaciones se desarrollarían de la siguiente manera:

Moto en frenada → Moto en paso por curva → Moto en aceleración

Analizando el mapa del circuito (Figura 9.1) se ha decidido seleccionar primera curva tras la recta de meta para la realización de este estudio, ya que se trata de una curva de baja-media velocidad a la que el piloto se enfrenta tras venir a alta velocidad de una recta.



**Figura 9.1** *Circuito Motorland*

Los datos referentes a velocidades, ángulos de giro en curva y distancias de frenado de este circuito están generalmente relacionados con la categoría MotoGP™, lógicamente, los prototipos construidos para participar en la competición Motostudent están lejos de alcanzar estos valores. Se revisaron documentos de anteriores ediciones de Motostudent y se analizaron varios videos de pilotos de MotoGP™, en los que se mostraba velocidad e inclinación de la moto, esto permitió suponer datos generales para la simulación de esta trayectoria, tales como, velocidad máxima, velocidad de entrada en la curva, velocidad mínima de paso por curva o inclinación máxima de la moto respecto al eje vertical durante la curva:

- Velocidad máxima: 200 km/h (55,5 m/s)
- Velocidad de entrada en la curva: 85 km/h (23,6 m/s)
- Velocidad mínima de paso por curva: 70 km/h (19,4 m/s)
- Inclinación máxima: 45°

Una vez realizadas estas suposiciones, se pueden dividir la trayectoria en las tres situaciones descritas anteriormente, aunque ahora se podrá realizar esta acotación mediante un intervalo de velocidades:

1. Se parte de una velocidad máxima de 200 km/h, momento en que comienza la frenada hasta reducir la velocidad a 85 km/h.

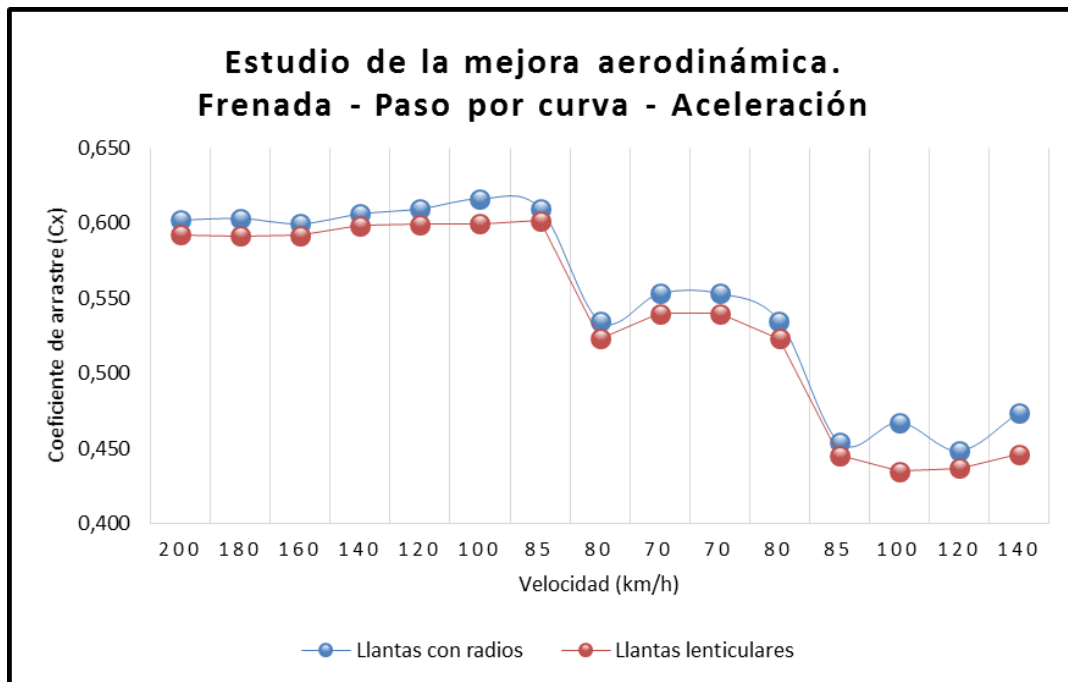
2. El piloto comienza a trazar la curva mientras se inclina junto con la moto y pierde algo de velocidad. Alcanza la inclinación máxima ( $45^\circ$ ) y la velocidad mínima (70 km/h) en el vértice de la curva.
3. Una vez pasado el vértice, comienza de nuevo la aceleración, progresiva hasta los 140 km/h.

De manera separada se realizará el estudio del rebufo que genera un piloto sobre el oponente que se encuentra detrás, reduciendo el coeficiente de arrastre. Esta situación se comparará con la situación de aceleración para comprobar que porcentaje de reducción del coeficiente de arrastre se consigue cuando se da esta situación en carrera.

## 9.1. Situación completa de paso por curva

Este apartado es la unión de las tres situaciones descritas anteriormente para realizar el trazado de una curva en un circuito. En primer lugar la frenada anterior a iniciar el paso por curva, la entrada y salida de la curva (en términos de simulación la entrada y la salida serán iguales) y por último la aceleración una vez trazada la curva.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 9.2, con las dos configuraciones de llantas estudiadas.



**Figura 9.2** Estudio de la mejora aerodinámica

Se observa claramente que durante las tres situaciones, se produce una reducción en el coeficiente de arrastre cuando están instaladas las llantas lenticulares. Las tres situaciones se ensayaron de manera separada debido a la complejidad que suponía realizar una simulación de este tipo, tanto por tiempo de cálculo como por dificultad a la hora de desplazar la moto dentro del túnel de viento para que recorra la trayectoria deseada. La figura permite ver

conjuntamente lo que ocurre en cada situación, así como corroborar que la mejora ensayada aumenta la eficiencia aerodinámica durante toda la trayectoria.

En los siguientes apartados se analizarán en profundidad los resultados obtenidos en cada una de las situaciones, tanto de numérica como gráficamente, visualizando el flujo de aire alrededor de las llantas para verificar los datos arrojados por el programa.

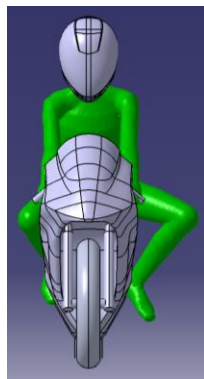
## 9.2. Situación de frenada

El momento de la frenada en competición es uno de los más importantes y junto al paso por curva, son las dos situaciones que requieren ciertas habilidades por parte del piloto para intentar recortar décimas al reloj. En términos aerodinámicos, el piloto tratará de aumentar el coeficiente de arrastre a la vez que acciona los frenos, ya que combinando ambas acciones podrá comenzar a frenar más tarde. Para ello, el piloto generalmente adopta una posición erguida encima de la moto, actuando como una barrera contra el viento, como se muestra en la Figura 9.3.

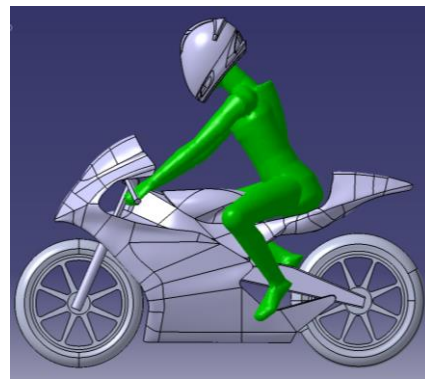


**Figura 9.3** *Piloto en situación de frenada*

Para esta prueba, se configuró el piloto en Catia™, para que adoptase una posición poco aerodinámica, mediante el método explicado en el apartado 6.2.4 sobre la generación y colocación del maniquí encima de la moto, como se observa en la Figura 9.4.



a) Vista frontal

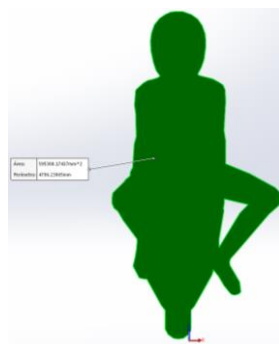


b) Vista lateral

**Figura 9.4** *Piloto situación de frenada en Catia™*

Tras la realización y análisis de resultados de los estudios de convergencia, se decidió que el ensayo 6 era el más adecuado para llevar a cabo estas simulaciones de situaciones en carrera.

En lo referente a área y longitud de referencia, el área de referencia se calculará empleando Catia™ y Solidworks™ (Figura 9.5), tal y como se hizo para los estudios de convergencia con la moto modificada y con las ruedas en movimiento. Por su parte, la longitud de referencia es la misma para todos los ensayos.



**Figura 9.5** *Medición del área frontal. Situación de frenada*

El área frontal medida en esta posición es 0,595 m<sup>2</sup>, considerablemente superior al área frontal cuando el piloto está en posición de mínima resistencia.



Las características de este estudio son:

- *Modelo de turbulencia:* Automático
- *Generación de turbulencia:* Automático
- *Longitud de referencia:* 1,232 m
- *Área de referencia:* 0,595 m<sup>2</sup>
- *Dimensiones túnel de viento:* 15 x 4 x 6 m
- *Tiempo de simulación:* 1 s
- *Courant:* 1
- *Resolved scale:* 0,05 m
- *Algoritmo de refinamiento:* Adaptative Refinement
- *Target resolved scale:* 0,0125 m
- *Distancia de control de la turbulencia:* 5 m

Este ensayo de la frenada se llevará a cabo con diferentes velocidades, partiendo de una velocidad punta de 200 km/h (55,5) m/s hasta una velocidad de entrada en curva de 85 km/h (23,6 m/s). Los intervalos en los que se estudiará la moto en frenada van decreciendo en 20 km/h, hasta llegar a 85 km/h.

Para asemejar el estudio a una situación real, se va a tener en cuenta el giro de las ruedas dependiendo de la velocidad de la moto. La Figura 9.6 las velocidades a las que debe girar cada rueda en función de la velocidad a la que circule la moto. La explicación de cómo se realizó el cálculo de la velocidad angular que tienen las ruedas ya se explicó en el apartado 8.3.

Velocidad moto (m/s)	Vel. Ang delantera (grados/s)	Vel. Ang trasera (grados/s)
55,50	11260,32	10728,46
50,00	10144,44	9665,28
44,40	9008,26	8582,77
38,80	7872,08	7500,26
33,30	6756,19	6437,08
27,70	5620,02	5354,57
23,60	4788,17	4562,01

**Figura 9.6** Velocidades angulares de las ruedas delantera y trasera. Situación de frenada

A continuación se muestra en la Figura 9.7 se muestran imágenes de la moto en el programa XFlow™ con las dos ruedas en las que se estudiará la frenada, las ruedas originales y las lenticulares.



a) Llantas originales



b) Llantas lenticulares

**Figura 9.7** Honda™ RS125 con diferentes tipos de llanta. Situación frenada

Como se ha dicho anteriormente, variando la velocidad desde 200 a 85 km/h, se realizaron los estudios de las dos configuraciones de moto dentro del túnel de viento. Los resultados obtenidos se muestran en las Figura 9.8 y Figura 9.9.

Llantas con radios					
V(km/h)	V(m/s)	Cx	Cy	Des. tip. Cx	Des. tip. Cy
200	55,5	0,602	0,066	0,018	0,020
180	50	0,603	0,073	0,018	0,019
160	44,4	0,600	0,063	0,018	0,019
140	38,8	0,606	0,066	0,018	0,024
120	33,3	0,610	0,086	0,017	0,023
100	27,7	0,616	0,070	0,015	0,018
85	23,6	0,610	0,063	0,016	0,021

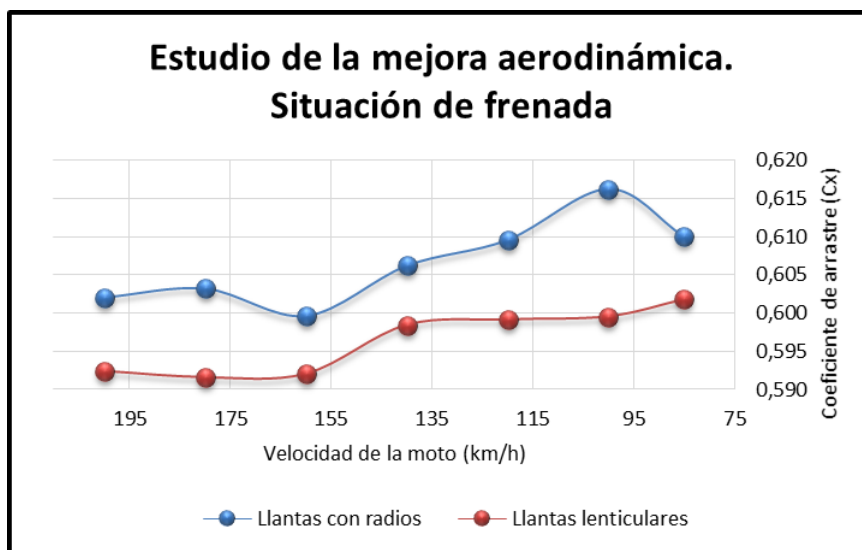
**Figura 9.8** Resultados llantas con radios. Situación frenada

Llantas lenticulares					
V(km/h)	V(m/s)	Cx	Cy	Des. tip. Cx	Des. tip. Cy
200	55,5	0,592	0,056	0,016	0,020
180	50	0,592	0,062	0,015	0,027
160	44,4	0,592	0,065	0,017	0,022
140	38,8	0,598	0,062	0,017	0,024
120	33,3	0,599	0,062	0,019	0,021
100	27,7	0,600	0,068	0,015	0,021
85	23,6	0,602	0,057	0,017	0,018

**Figura 9.9** Resultados llantas lenticulares. Situación frenada

En las Figura 9.8 y Figura 9.9 se muestran el promedio de los coeficientes de arrastre y sustentación, así como sus desviaciones típicas. Las desviaciones típicas calculadas muestran que los ensayos son fiables puesto que son valores pequeños, lo que supone una desviación pequeña entre resultados.

El parámetro que interesa analizar en estas situaciones de carrera es el coeficiente de arrastre, ya que la mejora aerodinámica tiene como objetivo la reducción del Cx. Por su parte el coeficiente de sustentación no se tendrá en cuenta en estos ensayos. Los resultados obtenidos se muestran en la (Figura 9.10):



**Figura 9.10** Estudio de la mejora aerodinámica en la situación de frenada

En la gráfica se puede observar claramente la reducción que se produce en el coeficiente de arrastre ( $C_x$ ) al instalar las llantas lenticulares en la moto. La reducción que se produce durante toda la frenada es cercana a 0,01. Además de la gráfica, también es importante realizar una tabla (Figura 9.11) en la que se muestre la disminución del coeficiente de arrastre en porcentaje:

V(m/s)	Cx (Llantas con radios)	Cx (Llantas lenticulares)	% de reducción
200	0,602	0,592	1,61
180	0,603	0,592	1,93
160	0,600	0,592	1,27
140	0,606	0,598	1,28
120	0,610	0,599	1,71
100	0,616	0,600	2,71
85	0,610	0,602	1,35

**Figura 9.11** Reducción del coeficiente de arrastre. Situación frenada

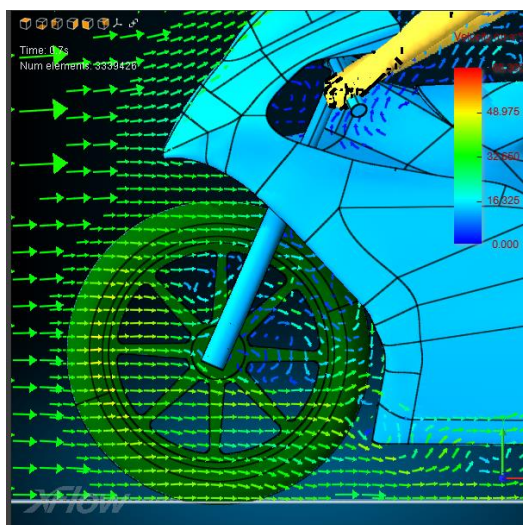
Una vez calculados los porcentajes de reducción en cada velocidad, se calcula el promedio de estos valores, resultando en un 1,69 % de reducción del coeficiente de arrastre al instalar las llantas lenticulares.

### 9.2.1. Análisis gráfico del flujo de aire. Situación de frenada

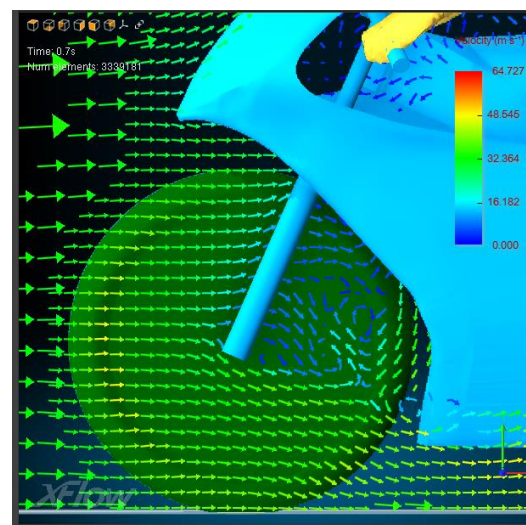
Además de los resultados comparados en la Figura 9.10, es conveniente estudiar los resultados gráficos que muestra el programa y que permiten hacerse una idea del comportamiento que sufre el flujo de aire al atravesar la moto. En este caso se van a comparar los resultados obtenidos a la misma velocidad (140 km/h).

En este apartado se van a mostrar los resultados gráficos obtenidos en el túnel de viento, permitiendo observar la circulación del aire alrededor de las llantas delantera y trasera, en sus dos configuraciones diferentes. El objetivo es corroborar los resultados obtenidos en la Figura 9.10, analizando los fenómenos que ocurren debido a la existencia de la moto dentro del túnel.

- **Rueda delantera:**



a) Llanta con radios



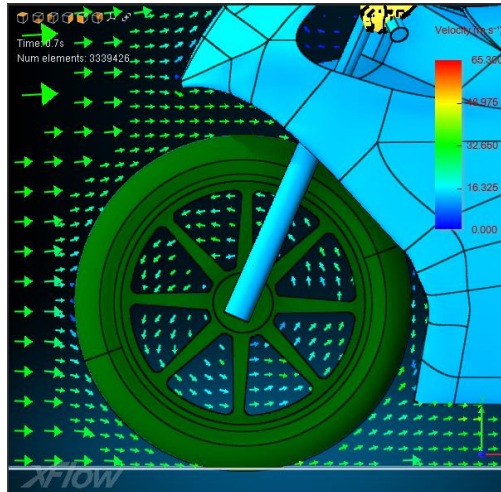
b) Llanta lenticular

**Figura 9.12** Comparación del flujo de aire en la rueda delantera. Situación de frenada

En la Figura 9.12, se colocó un plano perpendicular al eje de la rueda y cercano al borde de la llanta, para analizar lo que ocurría alrededor de la misma. Respecto a la rueda con llanta de radios, se observa claramente la existencia de dos torbellinos, uno de ellos debido a la resistencia que opone la suspensión. Mientras que en la rueda con llanta lenticular, se observa un flujo de aire

constante alrededor de la llanta, únicamente afectado por la existencia de la suspensión, que genera turbulencia.

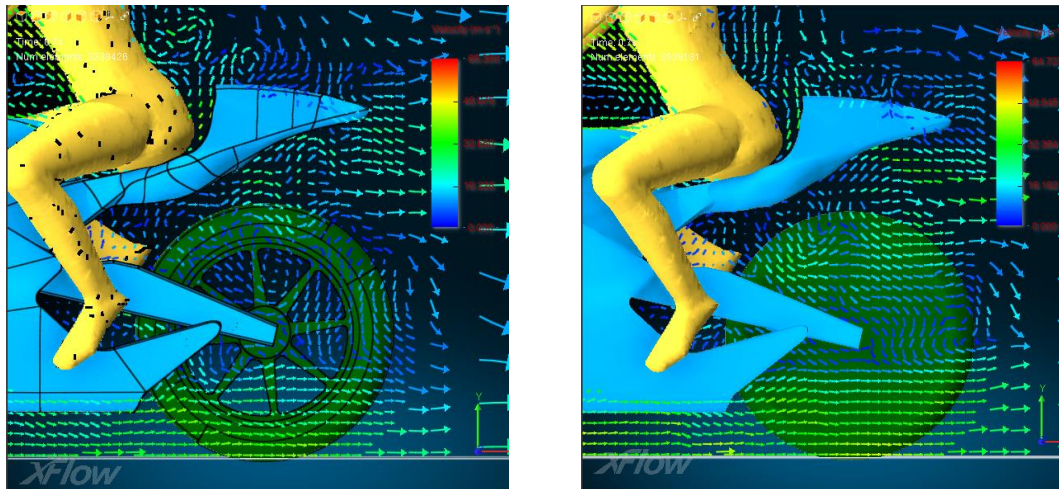
Por tanto se puede afirmar que la rueda con llanta de radios genera más arrastre debido a que la rotación de los radios induce un giro igual al flujo de aire, generando el torbellino que se observa encima de la suspensión. Además, si se ubica un plano en el centro de la llanta con radios, se ve claramente el movimiento rotacional que sufre el aire al entrar en contacto con la llanta (Figura 9.13).



**Figura 9.13** Detalle del flujo de aire en el centro de la llanta. Situación de frenada



- **Rueda trasera:**



a) Llanta con radios

b) Llanta lenticular

**Figura 9.14** Comparación del flujo de aire en la rueda trasera. Situación de frenada

En esta situación, la posición del piloto genera gran turbulencia, afectando directamente a la parte superior de ambas configuraciones, tal y como se ve en la Figura 9.14 por su parte, en la parte inferior de las ruedas, se puede diferenciar un flujo constante alrededor de la llanta lenticular, mientras que en la llanta con radios, se observa que comienza un giro rotacional debido a la presencia de los radios, generando un mayor arrastre.

### 9.3. Situación de paso por curva

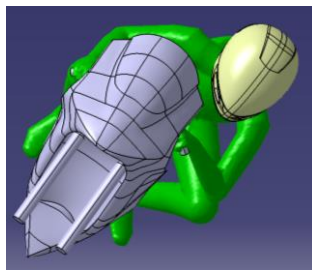
Uno de los momentos que requieren más técnica por parte del piloto es el paso por una curva, ya que debe recorrer la mejor trayectoria a la mayor velocidad posible. En términos de aerodinámica, no tiene tanta importancia en comparación con los coches, ya que no se cuenta con apoyo aerodinámico de alerones ni otros apéndices. Aunque se tratará de ver el progreso que se consigue con la instalación de las ruedas lenticulares, analizando más exhaustivamente la generación de momento de vuelco debido a viento lateral, que puede generar inestabilidad y pérdida de velocidad, con la consiguiente pérdida de tiempo en el cronómetro.

En cuanto a la posición que ocupa el piloto encima de la moto, el objetivo es conseguir la máxima inclinación de la moto, por lo que el piloto trata de llevar todo su peso hacia el lado de la curva, sacando la rodilla hasta rozar el asfalto, tal y como se ve en la Figura 9.15:

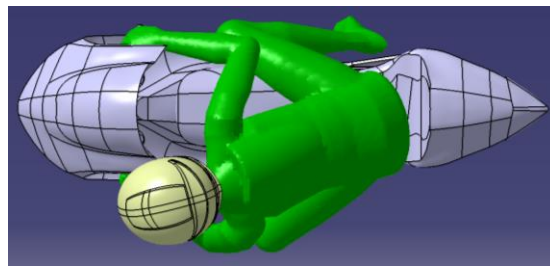


**Figura 9.15** *Piloto en situación de paso por curva*

Como se realizó en la situación de frenada, se configuró el piloto en Catia™ para que adoptase esa postura encima de la moto, de nuevo mediante el método explicado en el apartado 6.2.4 en el que se explicaba cómo generar un maniquí y su posterior colocación en la moto. El resultado obtenido es el que se muestra en la Figura 9.16:



a) Vista frontal

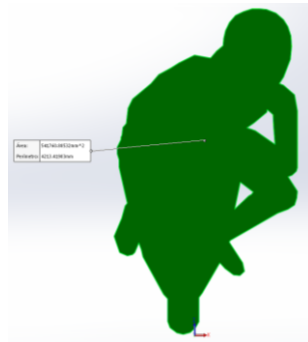


b) Vista en planta

**Figura 9.16** *Piloto situación de paso por curva en Catia™*

Para calcular el área y la longitud de referencia, se empleó Catia™ y Solidworks™ de la misma manera que en el apartado anterior (Figura 9.17). El área de referencia calculada fue  $0,542 \text{ m}^2$  y la longitud de referencia  $1,232 \text{ m}$ , igual para todos los ensayos.





**Figura 9.17** Medición del área frontal. Situación de paso por curva

Las características de este estudio son:

- *Modelo de turbulencia:* Automático
- *Generación de turbulencia:* Automático
- *Longitud de referencia:* 1,232 m
- *Área de referencia:* 0,542 m<sup>2</sup>
- *Dimensiones túnel de viento:* 15 x 4 x 6 m
- *Tiempo de simulación:* 1 s
- *Courant:* 1
- *Resolved scale:* 0,05 m
- *Algoritmo de refinamiento:* Adaptive Refinement
- *Target resolved scale:* 0,0125 m
- *Distancia de control de la turbulencia:* 5 m

En este ensayo se van a simular tres inclinaciones de la moto. La primera tendrá una inclinación de 22,5°, la segunda se estudiará con una inclinación intermedia de 33,75°, mientras que la tercera tendrá la inclinación máxima de la moto en la curva 45°.

En la simulación con inclinación de 22,5°, se asignará una velocidad de 80 km/h (22,2 m/s), la cual será intermedia entre la velocidad más baja en la situación de frenada (85 km/h) y la velocidad más baja del paso por curva, que en el caso de la primera curva del circuito de Motorland y empleando esta motocicleta, se supuso en 70 km/h (19,4 m/s).

En el ensayo con inclinación de  $33,75^\circ$ , la velocidad será de 75 km/h (20,83 m/s). Esta inclinación y velocidad son intermedias respecto de las otras simulaciones que se ensayarán en este apartado.

La velocidad más baja en la curva se produce en el momento en el que el piloto pasa por el vértice de la curva, es a su vez el momento de máxima inclinación de la moto, por lo que para la inclinación de  $45^\circ$ , se tomará la velocidad de 70 km/h.

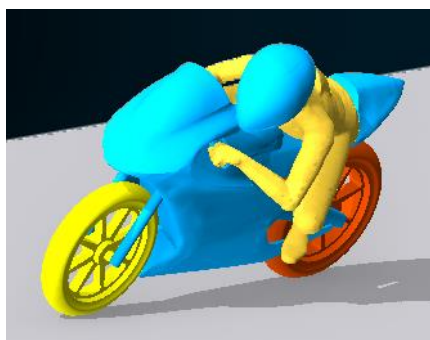
Una vez pasado el vértice de la curva, el piloto vuelve a levantar la moto y se supondrá que de nuevo vuelve a estar en las posiciones de  $22,5^\circ$  y  $33,75^\circ$  manteniendo las velocidades asignadas en cada caso.

En la Figura 9.18 se muestran las velocidades angulares de cada rueda, dependiendo de la velocidad a la que circula la moto:

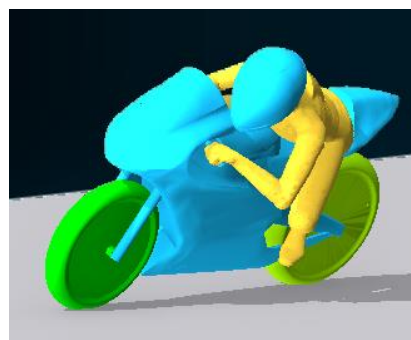
Velocidad moto (m/s)	Vel. Ang delantera (grados/s)	Vel. Ang trasera (grados/s)
22,20	4504,13	4291,38
20,83	4226,17	4026,56
19,40	3936,04	3750,13

**Figura 9.18** Velocidades angulares de las ruedas delantera y trasera. Situación de paso por curva

La Figura 9.19 permite ver la moto con las dos configuraciones cargadas en XFlow™, con una inclinación de 45° (máxima inclinación):



a) Llantas con radios



b) Llantas lenticulares

**Figura 9.19** Honda™ RS125 con diferentes tipos de llanta. Situación de paso por curva

Los resultados de los ensayos llevados a cabo en la situación de paso por curva se muestran en las Figura 9.20 y Figura 9.21:

Llantas con radios						
V(km/h)	V(m/s)	Inclinación (°)	Cx	Cy	Des. tip. Cx	Des. tip. Cy
80	22,2	22,5	0,535	0,047	0,013	0,018
75	20,83	33,75	0,544	0,122	0,016	0,024
70	19,4	45	0,553	0,205	0,011	0,026
75	20,83	33,75	0,544	0,122	0,016	0,024
80	22,2	22,5	0,535	0,047	0,013	0,018

**Figura 9.20** Resultados llantas con radios. Situación de paso por curva

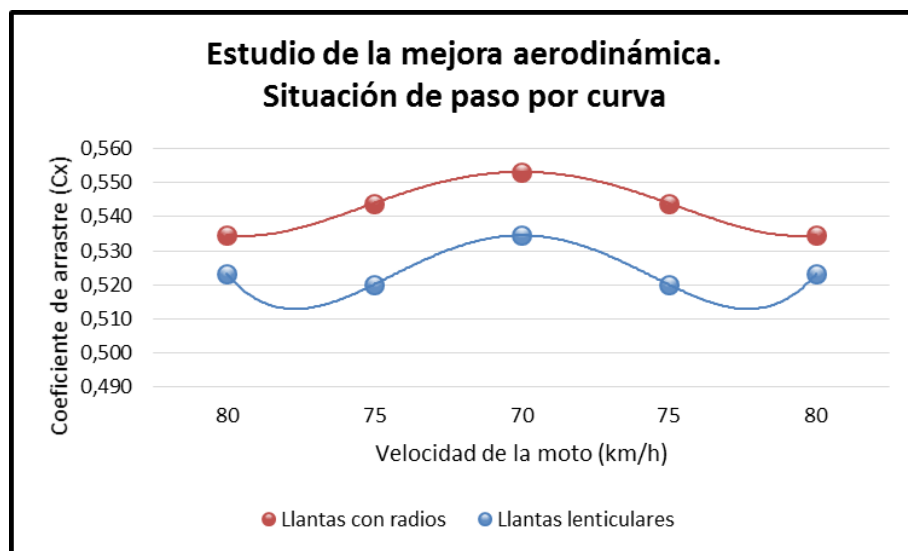
Llantas lenticulares						
V(km/h)	V(m/s)	Inclinación (°)	Cx	Cy	Des. tip. Cx	Des. tip. Cy
80	22,2	22,5	0,523	0,077	0,020	0,042
75	20,83	33,75	0,520	0,125	0,009	0,056
70	19,4	45	0,534	0,290	0,011	0,019
75	20,83	33,75	0,520	0,125	0,009	0,056
80	22,2	22,5	0,523	0,077	0,020	0,042

**Figura 9.21** Resultados llantas lenticulares. Situación de paso por curva

Se observa una reducción en los resultados promedio del coeficiente de arrastre de la moto con llantas lenticulares frente a la que tiene instaladas las

llantas con radios. Además la desviación típica de estos resultados es pequeña permitiendo afirmar que hay gran homogeneidad entre los valores con los que se calcularon los promedios. Por su parte, los valores promedio del coeficiente de sustentación no se tendrán en cuenta, además los resultados muestran datos heterogéneos.

Se van a representar los resultados obtenidos referentes al coeficiente de arrastre para mostrar con más claridad la mejora que produce la implementación de llantas lenticulares (Figura 9.22):



**Figura 9.22** Estudio de la mejora aerodinámica. Situación de paso por curva

La figura permite visualizar los resultados calculados, en la cual la diferencia entre puntos con misma velocidad se encuentra entre 0,01 y 0,03 favorable a las llantas lenticulares, las cuales generan un menor arrastre y por tanto pueden ir más rápido. En este caso sería interesante el estudio de los efectos que podría generar ráfagas de viento lateral al tomar la curva, analizando si sería un inconveniente importante o incluso si podría hacer volcar la moto.

En la siguiente tabla (Figura 9.23), se presentan los porcentajes de reducción que se producen en el coeficiente de arrastre comparando los dos tipos de llantas que se emplean en este proyecto:

V(km/h)	Cx (Llantas con radios)	Cx (Llantas lenticulares)	% de reducción
80	0,535	0,523	2,16
75	0,544	0,520	4,41
70	0,553	0,534	3,38
75	0,544	0,520	4,41
80	0,535	0,523	2,16

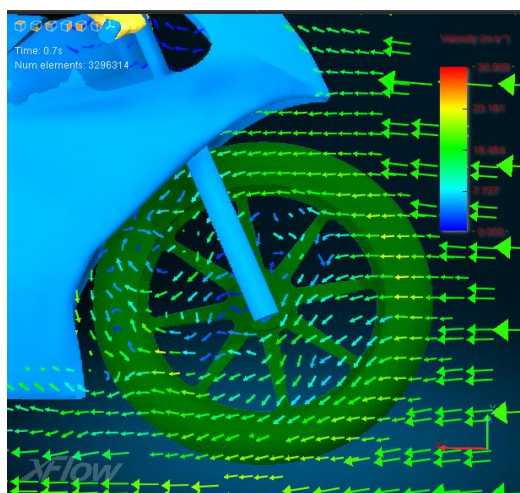
**Figura 9.23** Reducción del coeficiente de arrastre. Situación de paso por curva

Al realizar el cálculo del promedio de estos porcentajes de reducción del coeficiente de arrastre (Cx), se obtiene un porcentaje medio de reducción del 3,30 %, un valor más alto al que se produce en la frenada. Esto demuestra de nuevo que la mejora introducida mejora el rendimiento aerodinámico de la moto.

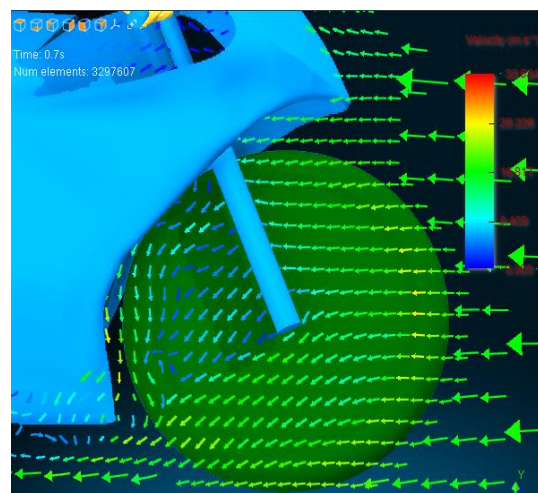
### 9.3.1. Análisis gráfico del flujo de aire. Situación de paso por curva

A continuación se va a analizar el flujo de aire que circula alrededor de las ruedas delantera y trasera, para ver qué efecto producen las llantas con radios y las llantas lenticulares. En este caso se va a escoger el momento en el que el piloto pasa por el vértice de la curva con una inclinación de 45° y una velocidad de 70 km/h (19.4 m/s).

#### Rueda delantera:



a) Llanta con radios

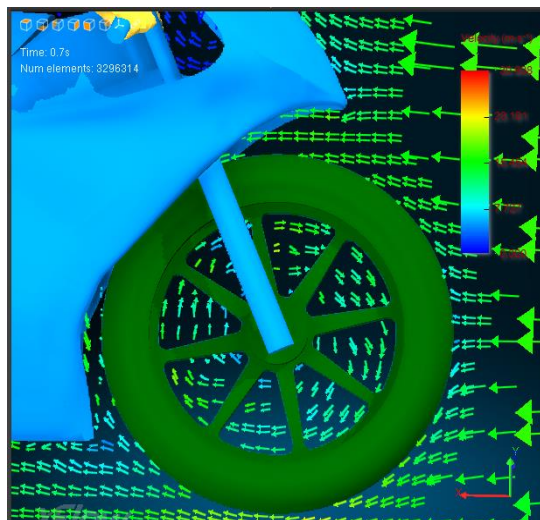


b) Llanta lenticular

**Figura 9.24** Comparación del flujo de aire en la rueda delantera. Situación de paso por curva

En la Figura 9.24 se observa la gran turbulencia generada por la rueda con llanta de radios frente a la llanta lenticular cuya turbulencia está generada en su mayor parte por la suspensión delantera. El plano de visualización se ubicó cerca del borde de la llanta y perpendicular al eje de giro de la rueda, para observar los efectos que se producen en las zonas cercanas a las llantas.

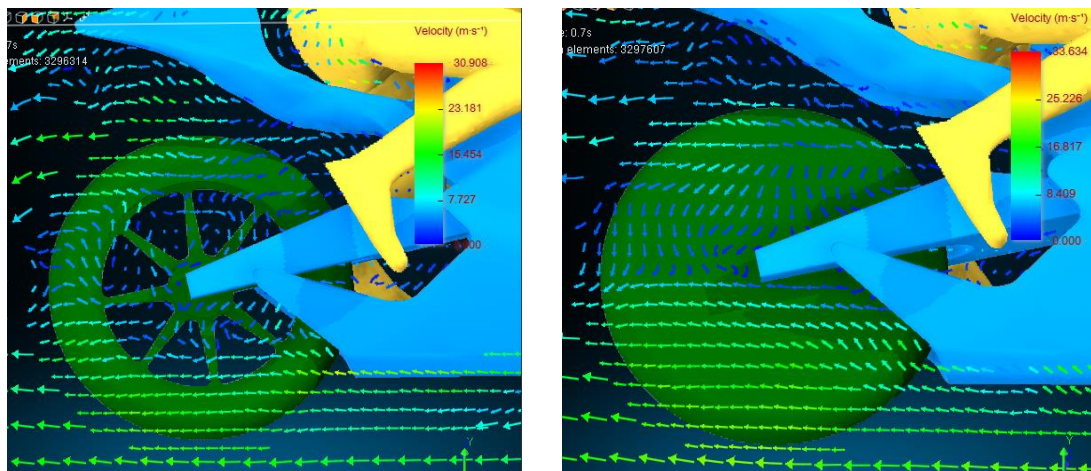
Por otra parte, en la Figura 9.25 se colocó el plano de visualización en el centro de la llanta con radios para observar, como en el caso de la frenada, el giro que la llanta induce al aire y que por tanto genera turbulencia y mayor arrastre.



**Figura 9.25** Detalle del flujo de aire en el centro de la llanta. Situación de paso por curva



### Rueda trasera:



a) Llanta con radios

b) Llanta lenticular

**Figura 9.26** Comparación del flujo de aire en la rueda trasera. Situación de paso por curva

Analizando en la Figura 9.26 la llanta trasera, la turbulencia que se genera es similar a la que se produce en la situación de frenada, ya que la postura del piloto influye en la turbulencia que se observa en la parte trasera de la moto, concretamente en la parte superior de la llanta. Por tanto, conviene estudiar la parte inferior de la llanta, zona donde se observan las mayores diferencias. La llanta lenticular muestra un flujo de aire prácticamente constante y que tiende a mantener la dirección sin generar torbellinos. En la llanta con radios el flujo tiende a mantenerse únicamente en la zona del neumático, ya que en la zona de radios hay una gran turbulencia y el aire cambia de dirección adquiriendo el giro transmitido por la llanta.

## 9.4. Situación de aceleración

Durante esta situación, el piloto debe buscar la posición de mínima resistencia aerodinámica, esto reducirá el arrastre total generado por la moto, mejorando la aceleración y por consiguiente el tiempo por vuelta. Probablemente, se observará el mayor descenso del coeficiente de arrastre debido a que en esta posición cualquier pequeña variante mejorará

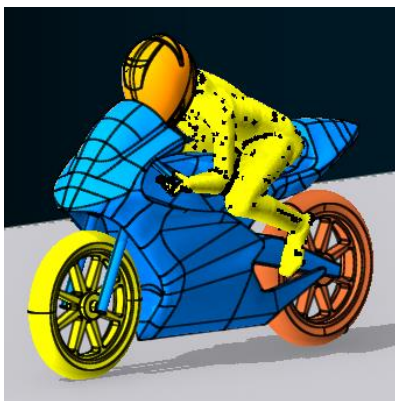
considerablemente este factor, ya que en las anteriores situaciones, hay gran turbulencia debido a la posición del piloto.

Por tanto el objetivo a la hora de generar el piloto en Catia™ es conseguir el menor área frontal posible, empleando de nuevo el método usado en el apartado 6.2.4. El resultado se debe asemejar lo máximo posible a la Figura 9.27.

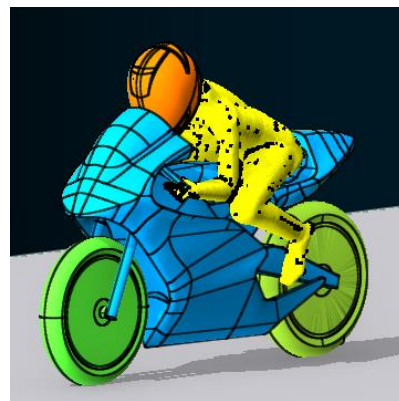


**Figura 9.27** *Piloto en situación de aceleración*

Se empleó el maniquí generado en Catia™ para los estudios de convergencia con las ruedas girando. Las dos configuraciones que se van a estudiar cargadas en el programa Xflow™ se muestran en la Figura 9.28:



a) Llantas con radios



b) Llantas lenticulares

**Figura 9.28** *Honda™ RS125 con diferentes tipos de llantas. Situación de aceleración*



En esta situación de aceleración, se realizarán ensayos en un intervalo de aceleración de 85 km/h (23,6 m/s) a 140 km/h (38,8 m/s), que corresponde con el momento en el cual el piloto ha trazado la curva y comienza a acelerar a fondo. El intervalo de velocidad que se tomará entre estudios es de 20 km/h, excepto en el caso de 85 km/h a 100 km/h que será de 15 km/h. De nuevo, las ruedas de la moto se encontrarán girando, en la Figura 9.29 se muestran las velocidades de las ruedas en función de la velocidad de la moto:

Velocidad moto (m/s)	Vel. Ang delantera (grados/s)	Vel. Ang trasera (grados/s)
23,60	4788,17	4562,01
27,70	5620,02	5354,57
33,30	6756,19	6437,08
38,80	7872	7500,25

**Figura 9.29** Velocidades angulares de las ruedas delantera y trasera. Situación de aceleración

Las características de este estudio son

- *Modelo de turbulencia:* Automático
- *Generación de turbulencia:* Automático
- *Longitud de referencia:* 1,232 m
- *Área de referencia:* 0,427 m<sup>2</sup>
- *Dimensiones túnel de viento:* 15 x 4 x 6 m
- *Tiempo de simulación:* 1 s
- *Courant:* 1
- *Resolved scale:* 0,05 m
- *Algoritmo de refinamiento:* Adaptive Refinement
- *Target resolved scale:* 0,0125 m
- *Distancia de control de la turbulencia:* 5 m

Una vez realizados los diferentes ensayos, se obtuvieron los resultados de ambas configuraciones, mostrados en las Figura 9.30 y Figura 9.31:

Llantas con radios					
V(km/h)	V(m/s)	Cx	Cy	Des. tip. Cx	Des. tip. Cy
140	38,8	0,474	-0,024	0,015	0,019
120	33,3	0,448	-0,018	0,013	0,017
100	27,7	0,454	-0,012	0,014	0,020
85	23,6	0,454	-0,013	0,015	0,021

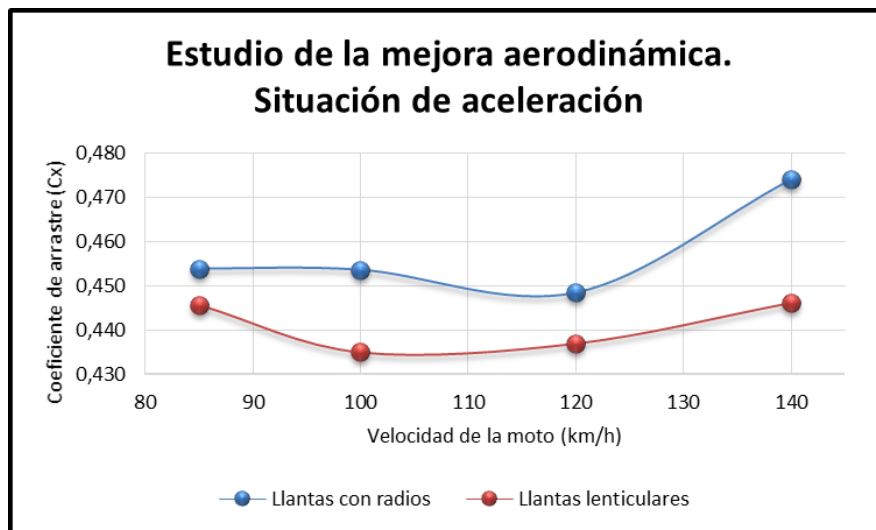
**Figura 9.30** Resultados llantas con radios. Situación de aceleración

Llantas lenticulares					
V(km/h)	V(m/s)	Cx	Cy	Des. tip. Cx	Des. tip. Cy
140	38,8	0,446	-0,024	0,015	0,018
120	33,3	0,437	-0,029	0,015	0,017
100	27,7	0,435	-0,030	0,011	0,014
85	23,6	0,446	-0,027	0,015	0,019

**Figura 9.31** Resultados llantas lenticulares. Situación de aceleración

Los valores aportados referentes al coeficiente de arrastre y de sustentación son valores promedio recogidos en simulaciones de 1 segundo, cabe destacar una disminución del coeficiente de arrastre entre las llantas con radios y las llantas lenticulares. A su vez, al analizar los valores de la desviación típica, se comprueba que los resultados obtenidos para el cálculo del promedio no sufren grandes desviaciones y son homogéneos.

De nuevo, como en los dos estudios anteriores, interesa comparar el coeficiente de arrastre obtenido en las dos configuraciones de llantas en la situación de aceleración (Figura 9.32):



**Figura 9.32** Estudio de la mejora aerodinámica. Situación de aceleración

En esta situación al igual que en la frenada y paso por curva se produce una reducción del coeficiente de arrastre al implementar las llantas lenticulares. Al ser la posición de menor resistencia aerodinámica, se observan los resultados en el coeficiente de arrastre más bajos de las tres situaciones. A continuación en la Figura 9.33, se muestra la reducción en porcentaje que se produce en el coeficiente de arrastre al utilizar las llantas lenticulares frente a las llantas con radios.

V(km/h)	Cx (Llantas con radios)	Cx (Llantas lenticulares)	% de reducción
140	0,474	0,446	5,89
120	0,448	0,437	2,55
100	0,454	0,435	4,10
85	0,454	0,446	1,81

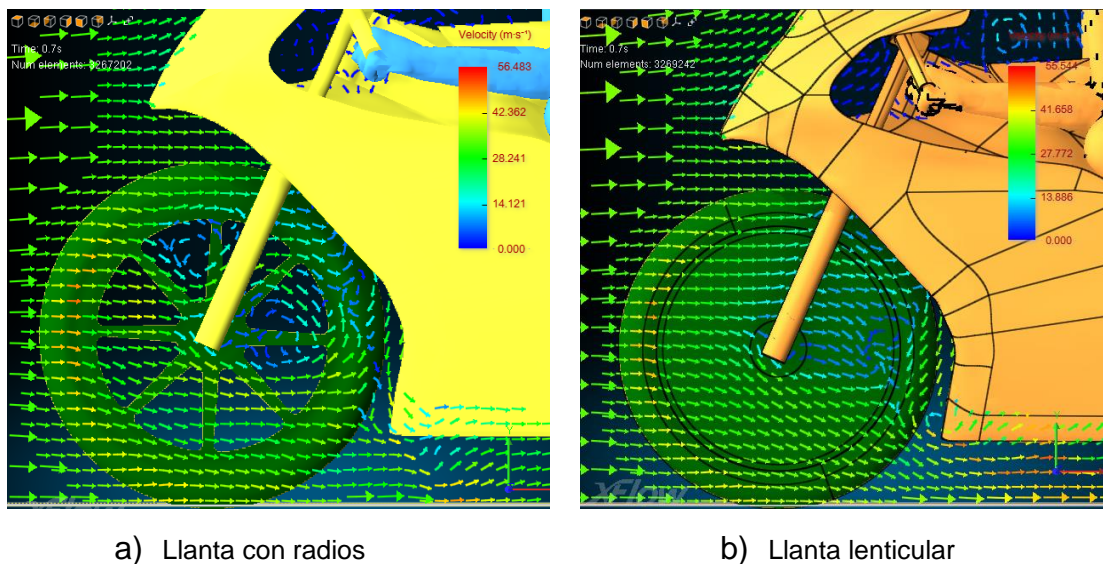
**Figura 9.33** Reducción del coeficiente de arrastre. Situación de aceleración

Realizando el promedio de los porcentajes de reducción del coeficiente de arrastre, se obtiene un valor de 3,59 % de reducción. Este valor es significativamente mayor que el valor obtenido en la frenada (1,69 %), por lo que estas llantas obtienen mejor rendimiento en esta situación.

#### 9.4.1. Análisis gráfico del flujo de aire. Situación de aceleración

Una vez calculado el beneficio que produce la implementación de las llantas lenticulares, se mostrará cómo cambia el comportamiento del aire en los alrededores de las llantas utilizando las dos configuraciones estudiadas. La única diferencia que existe es el tipo de llanta por lo que conviene analizar el efecto que producen éstas. En este análisis gráfico se van a comparar los resultados obtenidos a una velocidad de 140 km/h (38.8 m/s).

- **Rueda delantera:**

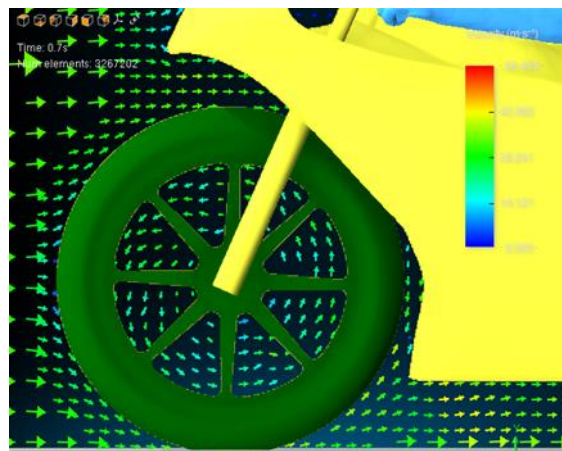


**Figura 9.34** Comparación del flujo de aire en la rueda delantera. Situación de aceleración

La Figura 9.34 muestra un plano perpendicular al eje de la rueda y ubicado en el borde exterior de la rueda, que permitirá analizar el flujo de aire alrededor de la llanta. Se observa claramente que en ambas imágenes se produce una turbulencia en la zona trasera de la llanta debido a la suspensión delantera. Mientras en la llanta lenticular el aire antes de la suspensión mantiene la dirección constante y no hay generación de turbulencia, en la llanta con radios se produce un torbellino en la parte superior de la llanta, provocada por la presencia de los radios.

El resultado obtenido en la Figura 9.34 es similar al obtenido en la situación de frenada, puesto que la rueda delantera no está influida por ningún otro elemento de la moto, excepto la suspensión delantera.

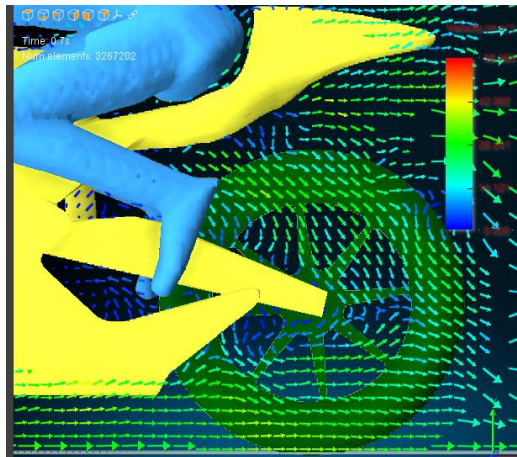
A continuación en la Figura 9.35, se introduce un plano que pasa por el centro de la llanta con radios, lo que permitirá ver con mayor precisión la influencia de los radios en el flujo de aire.



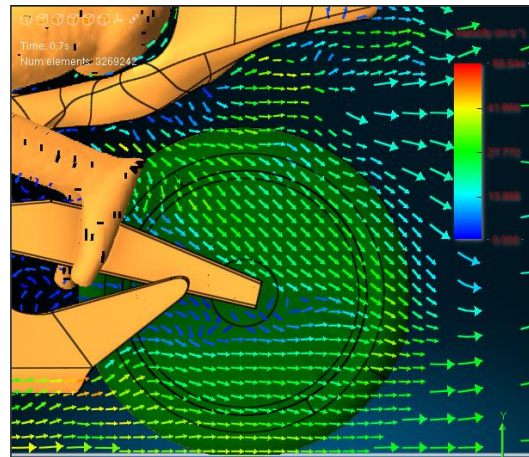
**Figura 9.35** *Detalle del flujo de aire en el centro de la llanta. Situación de aceleración*

El flujo de aire sufre un movimiento rotacional debido a la presencia de los radios, como se observa en la dirección de los vectores que representan el aire en el túnel de viento.

- **Rueda trasera:**



a) Llanta con radios



b) Llanta lenticular

**Figura 9.36** Comparación del flujo de aire en la rueda trasera. Situación de aceleración

En esta posición, el piloto genera la menor resistencia posible, por lo que su influencia en el flujo alrededor de la rueda trasera es menos importante que en la frenada y paso por curva. Analizando ambas llantas (Figura 9.36), la lenticular mantiene un flujo relativamente constante, pero alterado por el carenado y suspensión trasera de la moto. Por su parte, la llanta con radios genera una gran turbulencia, aplicando un giro al aire como muestran los vectores de la Figura 9.36 (a).

Se puede concluir que las llantas con radios generan más turbulencia y por tanto mayor arrastre que las llantas lenticulares, al igual que pasaba en los dos estudios previos.

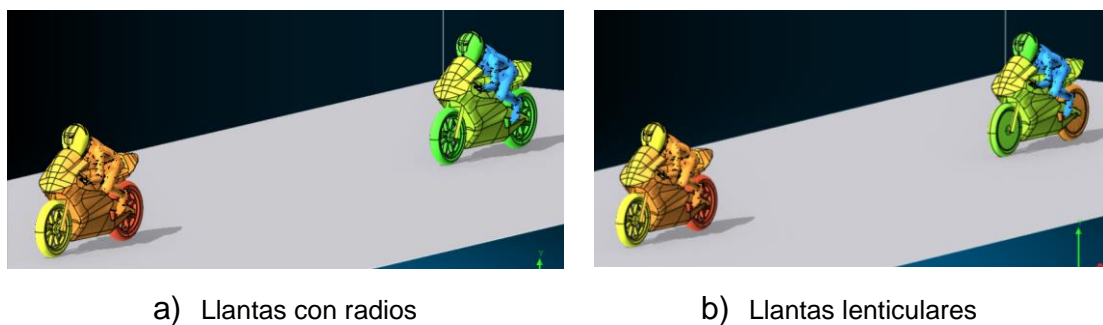
## 9.5. Situación de adelantamiento con rebufo

En esta última situación que se va a estudiar, la moto está ubicada detrás de otra moto, aprovechando el efecto producido por el rebufo para realizar el adelantamiento. El objetivo de este apartado es comprobar la reducción que se produce en el coeficiente de arrastre cuando una moto está a rebufo de otra,



instalando en la moto las llantas lenticulares así como las llantas con radios. Además de estas dos configuraciones, también se analizará cómo afecta la distancia entre las motos a la reducción del arrastre.

En Figura 9.37, se puede observar cómo se ubican ambas motos dentro del túnel de viento. Al iniciarse el experimento, se encuentran a una distancia de 6 metros y al finalizar se encuentran a 4 metros:



**Figura 9.37** Honda™ RS125 con diferentes tipos de llantas. Situación de adelantamiento con rebufo

En este ensayo, aunque la moto que viene por detrás debería tener una velocidad mayor debido al efecto del rebufo, para facilitar los cálculos, el aire que circulará por el túnel de viento y que simulará la velocidad de ambas motos será de 140 km/h (38,8 m/s), supondrá mayor facilidad para generar la simulación y los resultados no sufrirán una gran variación. Partiendo de esta base, para conseguir que la moto que viene por detrás se acerque a la primera, se empleará la opción “Enforced” para que avance de manera independiente mayor distancia, concretamente, la ecuación que gobernará el avance aumentará la velocidad de la segunda moto en 4 m/s. Por su parte, la velocidad angular de las ruedas corresponderá con la velocidad de 140 km/h, tal y como se ve en la Figura 9.38:

Velocidad moto (m/s)	Vel. Ang delantera (grados/s)	Vel. Ang trasera (grados/s)
38,80	7872	7500,25

**Figura 9.38** Velocidades angulares de las ruedas delantera y trasera. Situación de rebufo

Las características del ensayo son similares a las que se emplearon en la situación de aceleración, pero en este caso, el túnel de viento debe tener mayor longitud (17 m) debido a la existencia de dos motos:

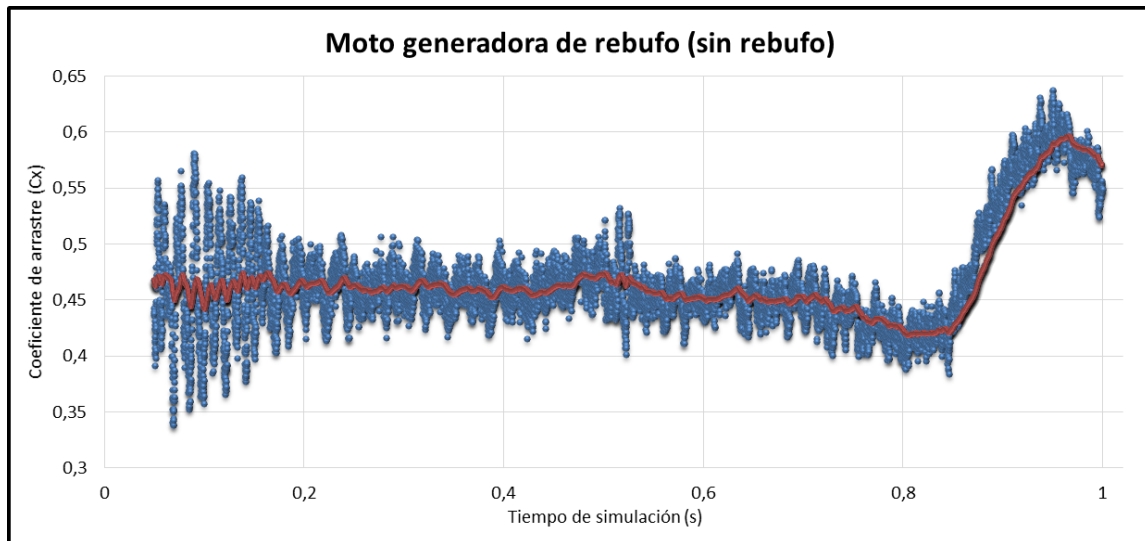
Las características de este estudio son

- *Modelo de turbulencia:* Automático
- *Generación de turbulencia:* Automático
- *Longitud de referencia:* 1,232 m
- *Área de referencia:* 0,427 m<sup>2</sup>
- *Dimensiones túnel de viento:* 17 x 4 x 6 m
- *Tiempo de simulación:* 1 s
- *Courant:* 1
- *Resolved scale:* 0,05 m
- *Algoritmo de refinamiento:* Adaptative Refinement
- *Target resolved scale:* 0,0125 m
- *Distancia de control de la turbulencia:* 5 m

A continuación se va a proceder a analizar los resultados obtenidos en las simulaciones llevadas a cabo. En primer lugar, se estudiará el coeficiente de arrastre que genera la moto sin rebufo, es decir, la moto que va por delante y que genera un vacío detrás que aprovecha la segunda moto. En segundo lugar, se profundizará en el análisis de la moto que viene por detrás y que aprovecha el vacío que genera la moto delantera, se analizarán por un lado las configuraciones de llantas con radios y llantas lenticulares y por el otro lado se analizará cómo influye la distancia entre motos sobre el coeficiente de arrastre.

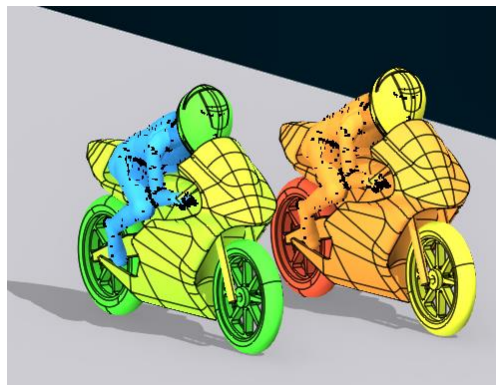
En la Figura 9.39 se observa el coeficiente de arrastre de la moto que va en primer lugar, la cual no tiene una moto delante de ella, por lo que debería tener un coeficiente de arrastre más elevado.





**Figura 9.39.** Coeficiente de arrastre de la moto generadora de rebufo

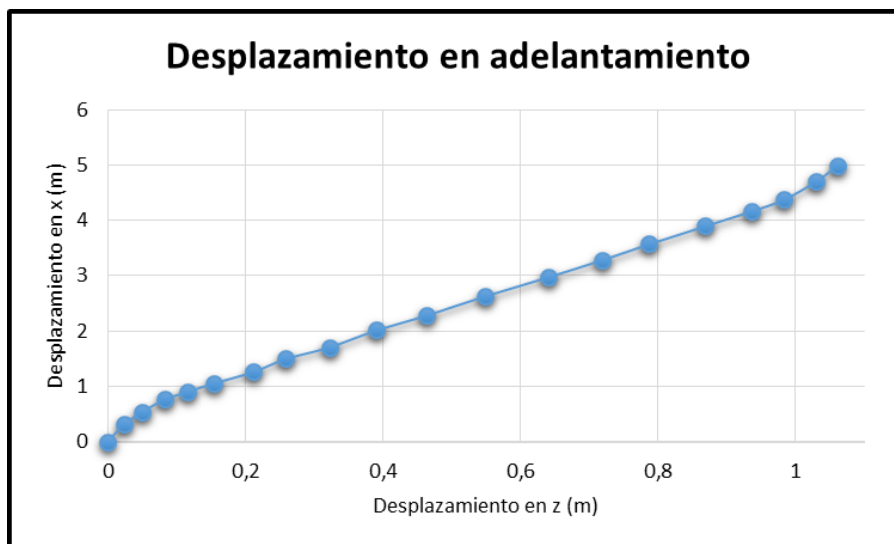
A lo largo de la simulación se ve una clara diferencia en la fluctuación de los resultados, al principio esta fluctuación es mayor que al final, donde los datos obtenidos convergen, esto se debe principalmente a que el programa necesita cierto tiempo para conseguir una estabilización en los resultados. Hasta el segundo 0,8 se observa un coeficiente de arrastre estabilizado, con un valor promedio de 0,458. A partir de ese instante, se produce un aumento considerable en el valor del coeficiente de arrastre, debido a que la moto que venía por detrás se encuentra emparejada Figura 9.40 y genera turbulencia que afecta a la eficiencia aerodinámica de la moto que genera el rebufo.



**Figura 9.40.** Motos emparejadas

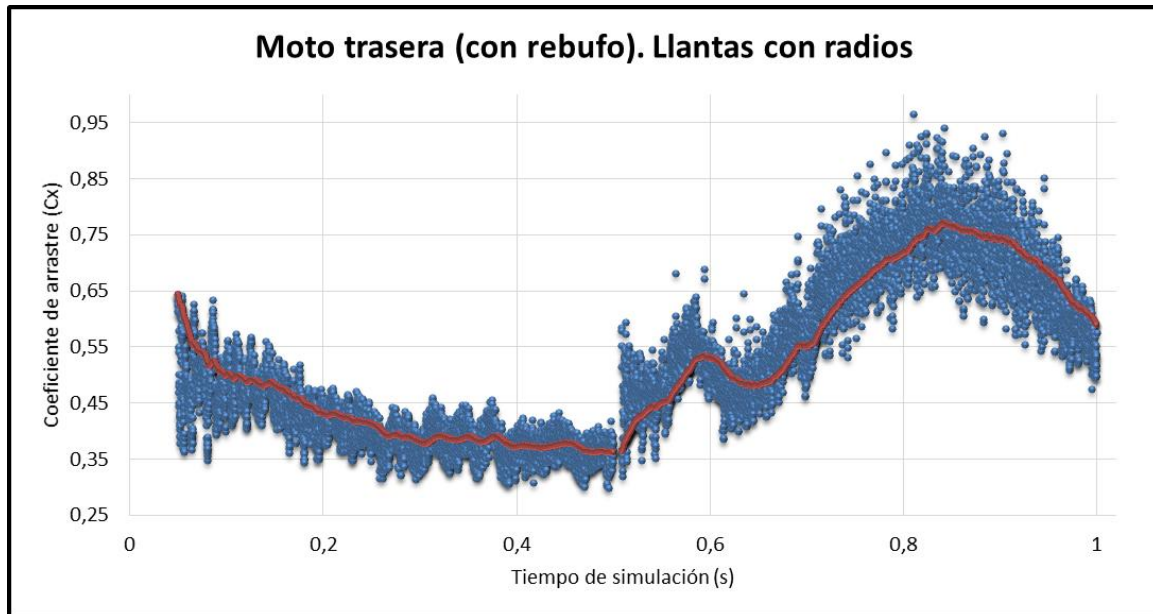
Una vez analizada la moto sin la ventaja del rebufo, se procede a estudiar la moto que aprovecha el vacío que genera la moto que le precede. Como se ha comentado anteriormente será interesante profundizar tanto en el tipo de llanta empleado como en la distancia entre motos.

El desplazamiento que debe hacer la moto en el adelantamiento se configuró de manera que la moto se separase un metro de la estela de la moto delantera, mientras avanzaba 5 metros hacia delante. De esta manera se obtuvo una gráfica no lineal (Figura 9.41) que gobernaba el movimiento de la moto en el momento del adelantamiento.



**Figura 9.41.** Desplazamiento de la moto en el adelantamiento

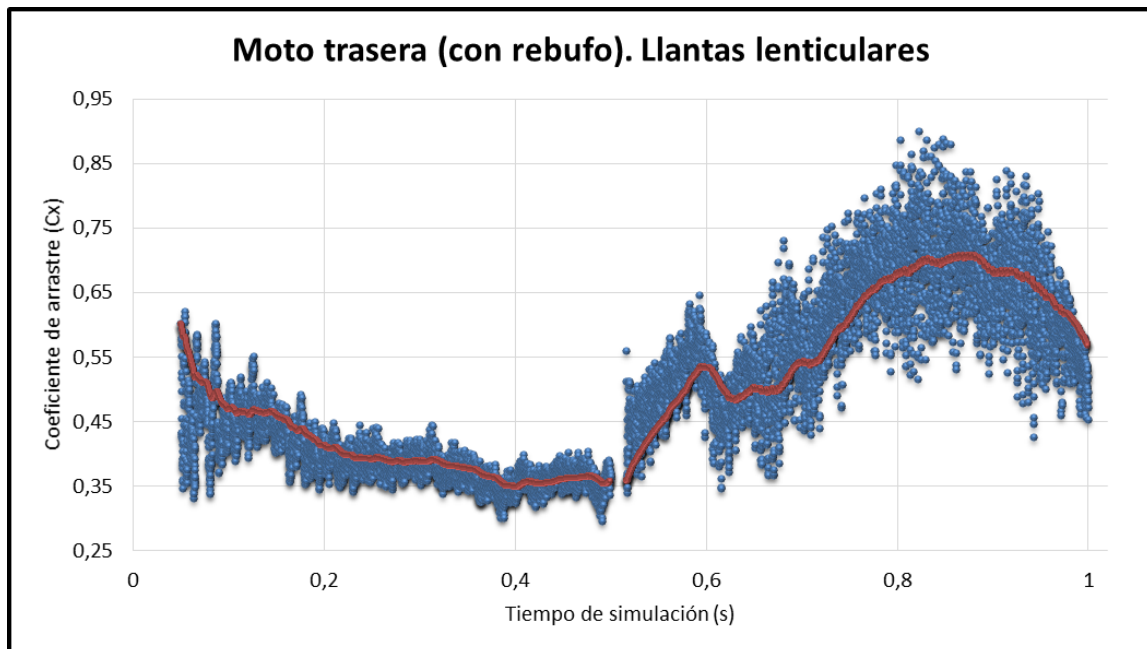
En la Figura 9.42 se muestra los resultados obtenidos para la moto con llantas con radios.



**Figura 9.42.** Resultados moto con llantas con radios. Situación de adelantamiento con rebufo

La gráfica está construida con el tiempo de simulación y el coeficiente de arrastre ( $C_x$ ). Hasta el segundo 0,5, la moto que viene por detrás se acerca a la moto delantera, pero se mantiene en la estela, aprovechando el vacío que genera y a partir de ese instante, comienza el adelantamiento hasta colocarse a la misma altura que la moto delantera. Se observa que en la primera mitad del ensayo, el coeficiente de arrastre disminuye conforme avanza el tiempo y el valor promedio es de 0,41, esto se debe a que la distancia entre motos se va reduciendo conforme avanza la simulación. En la segunda mitad del ensayo, la que corresponde al adelantamiento, la moto que viene por detrás se sale de la estela generada por la moto delantera, esto produce un aumento en el coeficiente de arrastre y además de esto conforme se empareja a la moto delantera, la turbulencia generada por cada moto afecta a la otra, aumentando aún más el coeficiente de arrastre, calculando un valor promedio se obtiene 0,62.

Por último, la Figura 9.43 muestra los resultados de la simulación llevada a cabo con la configuración de llantas lenticulares.



**Figura 9.43.** Resultados moto con llantas lenticulares. Situación de adelantamiento con rebufo

De nuevo, el ensayo se divide en dos partes, la primera termina en el segundo 0,5 y en ésta, la moto que viene por detrás se va acercando a la moto delantera pero se mantiene en la estela. En la segunda parte, la moto comienza el adelantamiento, saliéndose de la estela y emparejándose con la moto delantera al final del ensayo. Los resultados obtenidos son similares a los obtenidos en la gráfica anterior, lo único que cambia es que el valor promedio de la primera parte de la simulación es algo menor (0,395) que el obtenido con la moto con llantas de radios. Por su parte, el coeficiente de arrastre en el adelantamiento muestra un valor promedio de 0,595, un valor menor al obtenido en el ensayo anterior.

La diferencia en el coeficiente de arrastre durante de la fase del rebufo entre las dos configuraciones de llantas es de 0,016, lo que supone un porcentaje de reducción de 3,89 %. Por otra parte, la mejora que genera el rebufo en el coeficiente de arrastre supone una reducción del mismo de 10,85 % en el caso

de la moto con llantas de radios y 14,32 % en el caso de la moto con llantas lenticulares. Por tanto, se llega a la conclusión de que las llantas lenticulares mejoran la eficiencia aerodinámica, al igual que en las tres situaciones estudiadas anteriormente.



## **10. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS**





## 10. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

### 10.1. Conclusiones

Tras concluir los diferentes ensayos referentes a situaciones de carrera y una vez analizados los resultados obtenidos para cada una de ellas, empleando las llantas con radios con las que contaba la moto originalmente así como las llantas lenticulares que se probaron para comprobar que mejoraban la eficiencia aerodinámica, se ha demostrado que éstas últimas disminuyen el coeficiente de arrastre en mayor o menor medida dependiendo de la situación de carrera. En el momento de aceleración se produce un mayor porcentaje de reducción del coeficiente de arrastre (3,59 %), mientras que en la situación de frenada se produce el menor porcentaje (1,69 %). Por su parte en la situación de rebufo se ha demostrado por un lado que el vacío generado por una moto puede ser aprovechado por una moto que venga detrás, reduciendo un gran porcentaje el coeficiente de arrastre y por otro lado, la mejora aerodinámica implementada ofrece también una reducción del coeficiente de arrastre, en el caso de la llanta lenticular, el coeficiente de arrastre se redujo un 3.89 % con respecto a la llanta de radios.

El objetivo principal del proyecto que consistía en realizar un estudio aerodinámico de un moto, en concreto de una Honda™ RS125, mediante el empleo de técnicas simulación CFD, se ha conseguido llevar a cabo utilizando el software Xflow™ como herramienta para estudiar la aerodinámica de la moto en diferentes situaciones, así como la implementación de una mejora aerodinámica que reduce el coeficiente de arrastre. Iniciando el proceso con unos estudios de convergencia que permitían calcular que números de elementos eran necesarios emplear en el mallado del túnel de viento para conseguir un valor de coeficiente de arrastre semejante al valor real, así como obtener un tiempo de simulación relativamente pequeño, pero que ofrezca buenos resultados.

Una vez analizados los tres estudios de convergencia calculados con diferentes configuraciones de moto, se procedió a seleccionar los parámetros

que se emplearían en un modelo base con el que se realizarían las posteriores simulaciones de diferentes situaciones en carrera. Para elegir el ensayo cuyos parámetros se utilizarían en el modelo base, se estudió el número de elementos de malla que generaba el ensayo y el tiempo de cálculo necesario para completar la simulación.

El último capítulo del trabajo trata sobre el estudio de diferentes situaciones durante una carrera de motos, en este proyecto en concreto, se realizaron estudios en frenada, paso por curva, aceleración y rebufo. Las tres primeras se estudiaron para una misma trayectoria, desde que el piloto comienza a frenar antes de entrar en una curva hasta que sale de la curva acelerando. Por su parte, la situación de rebufo o adelantamiento se realizó de manera separada al resto de ensayos. Al finalizar el proyecto se puede concluir que se ha cumplido el objetivo principal del proyectista puesto que se ha profundizado en el uso de herramientas de simulación CFD realizando una investigación real, las cuales no se han estudiado durante el Grado de Ingeniería Mecánica y que han permitido aprender nuevas ramas de la ingeniería.

Este proyecto ha permitido trabajar en equipo, principalmente con el compañero Rubén Huarte Martínez, con el que se trabajó conjuntamente al inicio del proyecto, resolviendo los problemas que aparecieron en los archivos de CAD de los elementos de la moto. Se profundizó en el uso software de diseño, en concreto Catia™ y Solidworks™ para solventar estos errores que surgieron al cargar los elementos de la moto por separado en el programa Xflow™

Además, aunque no está relacionado directamente con este trabajo, el proyecto de Motostudent™ permitió conocer cómo se trabaja en un equipo de competición, en el que cada ingeniero o grupo de ingenieros se dedican a diseñar una determinada parte o elemento de la moto, así como otros aspectos relacionados con un equipo de carreras, como es la búsqueda de patrocinadores.

## 10.2. Desarrollos futuros

El objetivo de este apartado es proporcionar ideas para posibles desarrollos en el futuro, relacionadas con el estudio aerodinámico en una moto de competición. El ámbito de la aerodinámica aplicada a motocicletas no está tan extendido como en los automóviles, principalmente porque es más complicado obtener mejoras aerodinámicas importantes. Por ejemplo, respecto a la implementación de alerones hay una clara diferencia entre vehículos de cuatro ruedas y de dos, prácticamente en todas las competiciones de coches, éstos llevan instalados alerones que aportan gran sustentación negativa. En la Figura 10.1 se observan diferentes alerones instalados en algunos coches de las competiciones de automóviles más importantes.



a) Mercedes DTM



b) Mercedes Formula 1

**Figura 10.1** Alerones en coches de competición

Por su parte, los alerones instalados en motos de carreras no eran muy comunes hasta que en 2015, algunos equipos de MotoGP™ comenzaron a instalarlos en la parte delantera del carenado (Figura 10.2), para corregir la elevación del tren delantero al acelerar y contrarrestar el momento de vuelco que se genera. El análisis de estos elementos lo llevó a cabo en su proyecto Rubén Huarte Martínez, miembro del equipo Motostudent™, que comprobó que la implementación de estos elementos en el carenado ofrecía una pequeña disminución en la sustentación positiva.



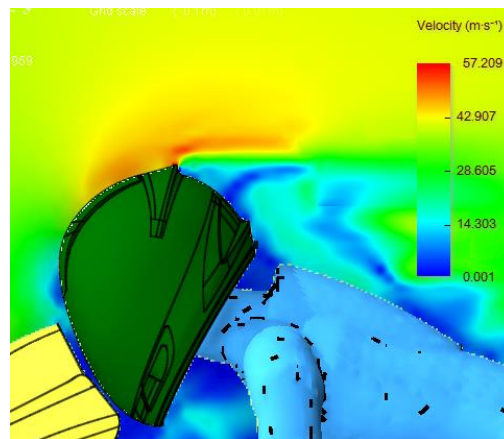
**Figura 10.2** Alerones en MotoGP™

Como se ha comentado, el estudio aerodinámico en motos es un campo amplio y poco conocido, en el cual se pueden desarrollar proyectos interesantes. A continuación se van a exponer algunos de los posibles proyectos que podrían llevar a cabo futuros estudiantes.

En primer lugar, hay que recordar que los estudios de la moto en diferentes situaciones de carrera no se hicieron de manera continua, sino que cada resultado obtenido se calculaba de manera individual en un ensayo con duración de 1 segundo, en el que posteriormente se realizaba el promedio de los resultados obtenidos en el período de tiempo en el que la simulación se estabilizaba. Se realizó de esta manera por la falta de potencia en los ordenadores en los que se trabajó, que generaban simulaciones demasiado lentas y que duraban demasiados días. Por tanto, sería interesante si se cuenta con ordenadores de mayor potencia de cálculo, llevar a cabo estos ensayos de manera continua, que permitiese validar los resultados obtenidos en este proyecto.

En segundo lugar, otro proyecto que se podría estudiar sería el efecto que generan ráfagas de aire intermitentes que actúen sobre el costado de la moto con las llantas de radios y las llantas lenticulares, analizando que fuerza lateral genera y si podría llegar a tumbar la moto.

En tercer lugar, durante este proyecto se observó que el casco del piloto generaba una turbulencia de aire en la parte superior del mismo, como se observa en la Figura 10.3, la cual se podría llevar a estudio y realizar un proyecto en el que el objetivo sea corregir esa turbulencia y mejorar esa zona del casco para que el aire no sufra esa turbulencia y por tanto se mejore el coeficiente de arrastre.



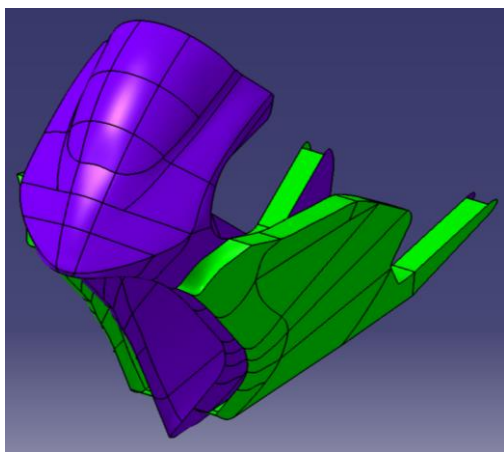
**Figura 10.3** *Turbulencia generada por el casco*

Por último, en el año 2015, el equipo Yamaha™ de MotoGP™, realizó una prueba con alerones ubicados de manera novedosa dentro de un doble carenado, que evitaba posibles cortes que pudieran producir los alerones a otros rivales, así como conseguir que el doble carenado actuase como “Endplates” separando la zona de alta presión de la de baja presión. En la Figura 10.4 se observa el doble carenado en los laterales de la moto, así como dos alerones ubicados entre la estructura principal del carenado y el doble carenado

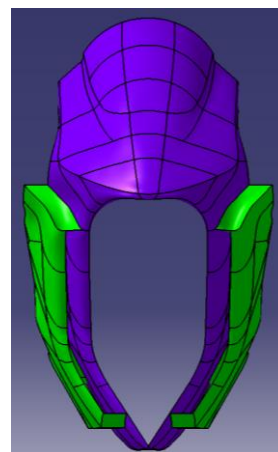


**Figura 10.4** Doble carenado en la Yamaha™ de MotoGP™

Utilizando Catia™ se realizó un doble carenado similar al que empleó el equipo Yamaha™, no se llevaron a cabo estudios con este nuevo elemento, pero sí que sería interesante la realización de pruebas en las que se colocasen alerones y se tratase de encontrar la configuración que ofreciese mayor mejora aerodinámica. En la Figura 10.5 se observa la adición del doble carenado, en color verde, sobre el carenado original, con una separación entre ambos de 5 centímetros. Permite una gran variación de parámetros, ya sean el tipo de alerón, separación entre carenados, tamaño del doble carenado, etc.



a) Vista isométrica



b) Vista frontal

**Figura 10.5** Doble carenado implementado en la Honda™ RS125

Como se ha comprobado, existen una gran variedad de posibles proyectos que se pueden desarrollar relacionados con la moto de competición. Se han expuesto algunos ejemplos en los que se pensó que podrían abordar otros projectistas más adelante, si se quisiese realizar algún proyecto en concreto para la Honda RS125. Esto permitiría aumentar la eficiencia en términos aerodinámicos, que como se ha visto en este proyecto, la mejora de un elemento o área de la moto supone un porcentaje muy pequeño, pero si se trabajan diferentes áreas puede suponer una gran mejora.





## **11. BIBLIOGRAFÍA**



## 11. BIBLIOGRAFÍA

[1] Houghton, E. L. , Carpenter, P. W. , Collicott, S. , Valentine, D. (2012) “*Aerodynamics for Engineering Students*” (6º Edition) ISBN-0080966322, Butterworth-Heinemann

[2] Foale, T. (2002) “*Motorcycle Handling and Chassis Design*” (2º Edition) ISBN-8493328634, FOALE, A.E.

[3] Zabala, U. (2010) “*Diseño y análisis aerodinámico de una motocicleta de competición*”

[4] Hucho, W. (1998) “*Aerodynamics of Road Vehicles*” (4º Edition) ISBN-0768000297, Society of Automotive Engineers, U.S.

[5] McBeath, S. (2000) “*Aerodinámica del automóvil de competición*” (1º Edición) ISBN-843291147X, CEAC

[6] Moto Engineering Foundation (2015) “*Reglamento Oficial de la Competición Motostudent*”

[7] Universidad Pública de Navarra (2013) “*Ingeniería de Fluidos*”

[8] Universidad Pública de Navarra (2016) “*Aerodinámica*”

[9] Xflow™ User Guide (2015)

[10] Muñoz, R. (2011) “*Introducción a la metrología*” Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado el 4 de Octubre de 2016 de <http://faii.etsii.upm.es/dfaii/Docencia/Libre%20eleccion/Material%20Docente%20Libre%20Eleccion/Introduccion%20a%20la%20Metrologia/TEMA%209.%20M%C3%A1quinas%20medidoras%20por%20coordenadas.pdf>

[11] Revilla, M. (2011) “*Aplicación de la fotogrametría para el control dimensional en serie de piezas de automóvil*” Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona. Recuperado el 4 de Octubre de 2016 de <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/12235>

[12] Biblioteca de la Universidad Pública de Navarra. Oficina de Referencia. (2016). Competencias informacionales: buscar, evaluar y utilizar la información. Trabajo de Fin de Grado de Ingenierías Industriales, Informática y de Telecomunicaciones. Recuperado el 4 de noviembre de 2014 de <https://miaulario.unavarra.es/portal/site/ci-para-ing-tfg>

Firma: